

---

# DESENVOLUPAMENT I ESTUDI DEL PRESSIO-DILATÒMETRE PRD

JOAN CARLES CASADO I ORTEGA

TUTORS: ANTONI GENS I SOLÉ, UPC

MARCELO DEVINCENZI, CONTROL Y PROSPECCIONES IGeoTest, S.L.

---

**RESUM.** La necessitat de caracteritzar cada vegada més el terreny i d'obtenir paràmetres de deformació i resistència del mateix, és un factor determinant a l'hora del desenvolupament dels assaigs *in situ*. La pressiometria no és una excepció en aquest sentit. És per aquesta raó que les innovacions s'han anat succeint al llarg dels anys, tant des del punt de vista pràctic com teòric. Així doncs, s'han anat incorporant nous transductors col·locats en diferents posicions, capaços de facilitar dades de desplaçament en diverses direccions del terreny que, units a nous mètodes d'interpretació, són els responsables del renaixement d'aquest antic assaig.

Aquest treball parteix de la idea de col·laborar en l'avanç i millora dels recursos pressiomètrics actuals.

En la primera part del treball es pretén fer un petit recorregut del que ha estat i del que és actualment la pressiometria. Partint de la definició de pressiòmetre es presenten els diferents tipus i les seves possibilitats a l'hora de caracteritzar un terreny. També es du a terme una revisió de la teoria de l'expansió d'una cavitat. Els paràmetres que es poden extreure i la seva fiabilitat formen el tram final d'aquest primer bloc dedicat a la pressiometria actual. Tot això s'acompanya d'una exhaustiva revisió bibliogràfica. Les possibilitats d'internet són de gran utilitat en aquesta tasca.

Al segon bloc del treball es presenta l'estudi i desenvolupament d'un nou pressio-dilatòmetre, anomenat *Pressio-Dilatòmetre PRD*. Les característiques principals són:

- Es destaca en primer lloc la utilització d'un sistema de mesura de desplaçaments format per quatre braços captors que estan contínuament en contacte amb la membrana i detecten qualsevol moviment que aquesta pateixi. Cada braç captor és solidari a un transductor tipus LVDT. La seva actuació sobre un mateix pla facilita mesures de desplaçament incrementals i independents en quatre sentits diferents separats 90° entre ells. Aquest fet permet determinar les heterogeneïtats presents al terreny i controlar la qualitat de la perforació. S'han trobat diverses dificultats al llarg del treball raó per la qual han sigut necessàries algunes modificacions mecàniques.
- S'han utilitzat membranes de poliuretà enlloc del tradicional cautxú. Aquest material presenta propietats interessants cara la seva utilització: és molt més elàstic que el cautxú, el seu gruix és sensiblement inferior al gruix de les membranes d'altres pressio-dilatòmetres presents al mercat i es caracteritzen per resistir fins a 30MPa. Aquest fet resulta un compromís molt interessant ja que es poden assajar sols i roques amb el mateix tipus de membrana. Ha sigut necessària la construcció d'un motlle especial per a les noves membranes. Per tal de caracteritzar aquest prometedor material s'han realitzat gran quantitat de calibracions tant de laboratori com *in situ*
- S'ha desenvolupat una nova unitat de control. Aquesta unitat de control permet gestionar l'assaig, i emmagatzemar les dades de pressió, desplaçament i fluència de cada braç, presentant alhora en temps real la corba d'expansió bruta. S'han programat diferents intervals de dades i configuracions. Les ordres s'introdueixen a través d'una pantalla tàctil. Aquest sistema porta a una captura de dades molt més acurada. D'altra banda, la influència de l'operari es redueix al mínim. Els detalls de protocols d'assaig i de calibració es programen amb el software PL7 Pro.

Per tal de comprovar el comportament de la sonda PRD *in situ*, s'han realitzat diferents proves de camp en tres litologies diferents si bé totes emmarcades dins el context geològic de la plana de l'Alt Empordà. També es presenta un assaig comparatiu amb la sonda OYO. Tot el procés d'anàlisi i interpretació de resultats, des de la realització de les corbes brutes i corregides fins al càlcul dels paràmetres geotècnics pertinents, portarà a dictaminar les conclusions que d'aquests es poden extreure i ajudaran a determinar l'enfoc dels desenvolupaments futurs de cara a millorar aquest primer projecte de pressio-dilatòmetre PRD.

El treball ha sigut completament finançat per Control y Prospecciones IGeoTest, S.L.

# INDEX

---

1 .- INTRODUCCIÓ .....	3
2 .- EL PRESSIÒMETRE. DEFINICIÓ .....	6
2.1 .- APARELLS PRESSIOMÈTRICS .....	8
2.1.1 .- Pressiòmetres amb perforació prèvia o <i>prebored</i> (PBP) .....	8
2.1.2 .- Pressiòmetres autoperforants o <i>self-bored</i> (SBP) .....	10
2.1.3 .- Pressiòmetres de penetració estàtica o <i>push in</i> (PIP) .....	12
2.2 .- CALIBRACIONS .....	14
2.2.1 .- Calibracions dels sistemes de mesura .....	14
Manòmetres de pressió .....	14
Transductors de desplaçament .....	14
Transductors de pressió total .....	15
2.2.2 .- Calibracions de la membrana .....	16
Rigidesa de la membrana .....	16
Compressibilitat de la membrana .....	17
2.2.3 .- Calibracions del sistema .....	21
Compressibilitat del sistema .....	21
3 .- INSTAL·LACIÓ .....	22
3.1 .- Pressiòmetres amb perforació prèvia (PBP) .....	22
3.2 .- Pressiòmetres autoperforants (SBP) .....	24
3.3 .- Pressiòmetres de penetració estàtica (PIP) .....	25
4 .- METODOLOGIA D'ASSAIG .....	26
4.1 .- Introducció .....	26
4.2 .- Assaig Ménard .....	26
4.3 .- Assaigs amb tensió controlada .....	27
4.4 .- Assaigs amb deformació controlada .....	27
5 .- ANÀLISI DE L'ASSAIG PRESSIOMÈTRIC .....	29
5.1 .- Solucions elàstiques en un medi isotròpic .....	30
Expansió d'un cilindre de paret gruixuda .....	30
5.2 .- Solucions elastoplàstiques perfectes .....	32
5.2.1 .- Expansió no drenada d'una cavitat cilíndrica .....	32
5.2.2 .- Expansió drenada d'una cavitat cilíndrica .....	34
5.2.3 .- Anàlisi general .....	34
6 .- INTERPRETACIÓ .....	37
6.1 .- Factors que alteren la interpretació dels assaigs pressiomètrics .....	37

6.2 .-	Estimació de la tensió horitzontal .....	37
1 .-	Mètode lift-off .....	38
2 .-	Mètodes basats en la resistència al tall .....	38
3 .-	Mètodes d'aproximació de funcions (Curve fitting) .....	38
4 .-	Correlacions semiempíriques .....	39
6.3 .-	Estimació del mòdul de tall (G) .....	40
	Correcció del mòdul de tall .....	42
6.4 .-	Estimació de la resistència al tall no drenada (Cu) .....	44
6.4.1 .-	Estimació a partir de l'anàlisi de càrrega en tensions totals .....	44
6.4.2 .-	Estimació a partir de l'anàlisi de descàrrega en tensions totals .....	45
6.4.3 .-	Estimació a partir de la pressió límit .....	46
6.5 .-	Estimació dels angles de fricció interna ( $\phi$ ) i de dilatació ( $\psi$ ) .....	48
6.6 .-	Estimació del coeficient de consolidació horitzontal .....	49
7 .-	DESCRIPCIÓ DE LA SONDA PRD .....	53
7.1 .-	Caracterització dels sistemes de mesura .....	56
7.1.1 .-	Captors de desplaçament .....	56
7.1.2 .-	Transductors de pressió .....	61
7.2 .-	Caracterització de les membranes de poliuretà .....	62
7.2.1 .-	Presentació de les membranes de poliuretà .....	62
7.2.2 .-	Calibració de les membranes .....	62
	Rigidesa de la membrana .....	63
	Compressibilitat de la membrana .....	65
7.3 .-	Captura de dades .....	67
7.3.1 .-	Funcionament de la unitat de control .....	67
	Metodologia d'assaig .....	68
	Metodologia de calibració .....	69
8 .-	REALITZACIÓ D'ASSAIGS .....	70
8.1 .-	Preparació de l'equip .....	70
8.2 .-	Instal·lació .....	70
8.3 .-	Metodologia d'assaig .....	71
9 .-	ANÀLISI DE RESULTATS OBTINGUTS .....	73
9.1 .-	ASSAIG 1: Llims sorrencs .....	73
9.2 .-	ASSAIG 2: Reblert argilós .....	78
9.3 .-	ASSAIG 3: Argila .....	81
10 .-	CONCLUSIONS .....	84
11 .-	REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES .....	85
A.1 .-	ANNEX DE CALIBRACIONS .....	87
A.1.1 .-	Calibracions de les membranes .....	88

# 1.- INTRODUCCIÓ

---

El primer document que fa referència al pressiòmetre data de l'any 1933 (Kogler), si bé cal situar l'inici de la pressiometria moderna al voltant dels anys cinquanta quan, de manera totalment independent, els professors Fang de la Universitat de Purdue i Louis Ménard de la Universitat de Illinois varen iniciar els seus estudis i desenvolupament de l'aparell pressiomètric. L'any 1955 Ménard va patentar el seu pressiòmetre, actualment conegut com a pressiòmetre Ménard. Ja al 1957 va fer els primers assaigs a Chicago, amb la finalitat d'obtenir les propietats del terreny pel disseny d'estructures. Arran d'aquesta primera actuació apareixen les primeres publicacions, fetes pel propi Ménard <sup>1</sup> [1], on s'exposen les característiques de l'aparell així com els principis de l'assaig, instal·lació, interpretació i aplicacions del mateix.

Ara bé, el desenvolupament no va ser gens fàcil, essent el problema més important la distorsió del terreny produïda per la realització de la perforació, de manera que desapareix la idea d'expansió en un material homogeni. Per tal de solucionar aquest problema, Ménard publica tota una sèrie de correlacions empíriques que s'utilitzen fins i tot avui dia.

Amb la idea de millorar aquest problema, Jézéquel [2] va argumentar que era possible la introducció del pressiòmetre al terreny sense alterar les seves propietats. Aquí va aparèixer la base del pressiòmetre autoperforant, que es va desenvolupar paral·lelament a França i Anglaterra. Es tracta d'un pressiòmetre que s'introdueix al terreny gràcies a un capçal que fa la perforació alterant mínimament les parets del taladre. D'aquesta manera els paràmetres obtinguts representen millor les propietats del terreny i no tant la metodologia d'instal·lació.

Ja a la dècada dels vuitanta s'ha desenvolupat un pressiòmetre que s'introdueix al terreny de manera estàtica, com el piezocon, mitjançant una força en superfície i comunament denominat *push in*. Sorgeix bàsicament per a ser utilitzat en geotècnia *offshore* i actualment la seva aplicació és qüestionada degut a l'alteració que significa la introducció al terreny.

La pressiometria sovint és objecte de congressos essent l'únic argument de les conferències, Paris (1982), Texas (1986), Oxford (1990), Quebec (1995), Atlanta (1998), Bali (2001). A més, les publicacions sobre el tema són cada vegada més abundants, existint clàssics de la pressiometria (Baguelin et al [3], Mair i Wood [4], Briaud [5], Clarke [6]).

Aquest treball farà un petit recorregut pel racons més pràctics de la pressiometria servint-se de totes les innovacions que s'han introduït al llarg dels anys i afegint un avenç més com és el desenvolupament del pressiòmetre d'alta pressió PRD.

La idea d'aquesta innovació va sorgir fa uns dos anys entre els tècnics de l'empresa IGEO TEST. La fabricació d'un primer prototip es trobava en un estat avançat de desenvolupament.

---

<sup>1</sup> MPM en nomenclatura actual.

L'objectiu del treball ha sigut supervisar les darreres etapes de desenvolupament per les quals s'han hagut de realitzar nombroses modificacions al projecte original, tant des del punt de vista del software com del hardware.

El pressio-dilatòmetre PRD<sup>2</sup> presenta com a principals atractius la possibilitat d'assolir els 300 bars de pressió i la capacitat de mesurar el desplaçament de la cavitat en quatre sentits diferents, i per tant en dues direccions de l'espai. Això és possible gràcies a la utilització de quatre braços captors<sup>3</sup> del desplaçament dotats de transductors capaços de donar una mesura incremental dels radis. És a dir, faciliten la magnitud del moviment relatiu en forma de quatre radis independents.

La nova sonda consta també d'una unitat de control capaç d'emmagatzemar els registres de desplaçament i de pressió. Aquest sistema està dotat d'una pantalla tàctil des d'on es controla tot l'assaig.

També s'introdueix un material alternatiu a les membranes de cautxú, com és el poliuretà.

Per acabar amb el procés de desenvolupament s'ha cregut oportú corroborar les capacitats del nou pressiómetre amb la realització de diversos assaigs a camp i les respectives calibracions prèvies. En algun cas s'efectuen comparacions amb un altre pressiómetre molt utilitzat a Espanya, l'OYO Elastmeter.

A la figura 1 es mostren les tasques desenvolupades al llarg de la tesina.

---

<sup>2</sup> Actualment existeix un llenguatge difús a l'hora de definir sondes pressiomètriques. Es considera pressiómetre a la sonda Ménard i pressio-dilatòmetre a les sondes tipus OYO. Estrictament, el terme pressiómetre és més correcte quan ens referim a l'aplicació de pressió mentre que dilatòmetre és un terme més correcte per a descriure una expansió deguda a la temperatura.

<sup>3</sup> La idea era treballar amb vuit braços, de fet es disposa de l'espai necessari per a incorporar-los, però degut a temes econòmics i de temps es va acabar treballant amb quatre.

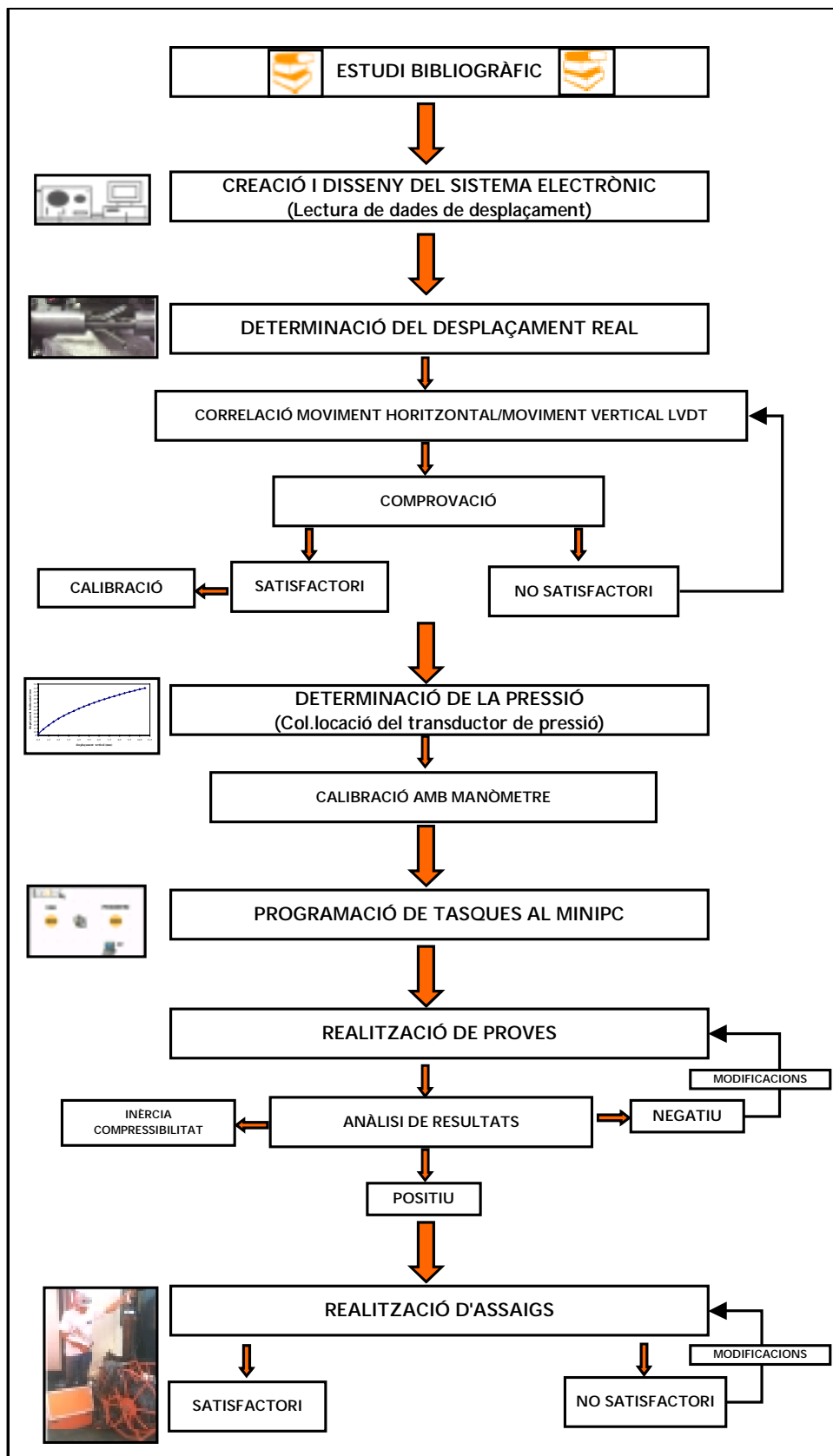


Figura 1.- Tasques de la tesina.

## 2.- EL PRESSIÒMETRE. DEFINICIÓ

Existeixen diverses definicions del pressiòmetre, però potser la més encertada sigui la següent (Clarke, [6]):

*Sonda cilíndrica dotada d'una membrana flexible dissenyada per a aplicar una pressió uniforme sobre les parets d'un sondeig o perforació.*

Partint d'aquí, l'assaig pressiomètric queda definit com l'expansió d'una membrana un cop la sonda s'ha situat a la secció d'assaig. Es monitoritzen les pressions i desplaçaments al llarg de l'assaig i s'utilitzen aquestes dades per representar les gràfiques tensió-deformació a partir de les quals es poden determinar les propietats del terreny o els paràmetres de disseny.

La sonda està connectada amb la superfície mitjançant un varillatge que s'utilitza tant per avançar la perforació (amb la canonada i corona de sondeig pertinent), com per baixar la sonda i situar-la a la posició d'assaig. Un cable umbilical connecta la sonda amb l'equip d'assaig en superfície que està format per la font de pressió, la unitat de control i un *datta logger* (Figura 2). La metodologia d'assaig pot ser tant a tensió controlada com a deformació controlada (aquests conceptes es presentaran més endavant).

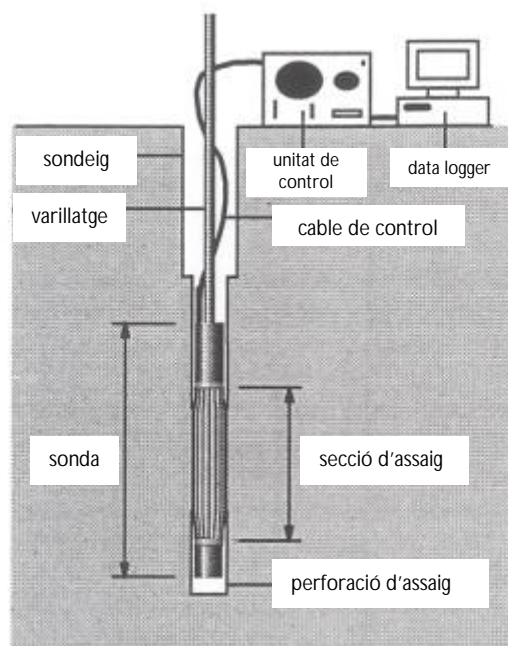


Figura 2.- Esquema bàsic d'un equip pressiomètric [6].

Les sondes pressiomètriques es poden agrupar en funció de la tècnica d'instal·lació (*prebored* o amb sondeig previ -PBP-, autoperforant -SBP- i *push in* o de penetració estàtica -PIP-) o bé en funció del mètode de mesura de la deformació (volum o desplaçament).

Segons el tipus de terreny es pot escollir un o altre aparell, però cal tenir present que la instal·lació del pressiòmetre canvia les propietats del terreny adjacent. A més a més, la mesura de la resposta del terreny depèn del sistema de mesura utilitzat. Per tant, la informació que es pot extreure d'un assaig pressiomètric depèn tant del tipus de sonda utilitzada com de les condicions del terreny en que s'ha realitzat l'assaig.

Els paràmetres que es poden obtenir de l'assaig pressiomètric són:

- Mòdul de tall (  $G$  o  $G_{ur}$  )
- Resistència al tall no drenat en argiles ( $C_u$ )
- L'angle de fregament intern en sorres ( $\phi'$ )
- L'angle de dilatància en sorres ( $\Psi$ )
- Tensió horitzontal in situ ( $\sigma_{ho}$ )
- Coeficient d'empenta al repòs ( $K_0$ )

Amb aparells més especials es pot deduir també el coeficient de consolidació horitzontal,  $C_h$ , i l'angle de fregament intern en argiles,  $\phi$ .

El grau d'èxit en la obtenció d'aquests paràmetres depèn de les condicions de realització de l'assaig i de la interpretació de les dades. Poden aparèixer dificultats a l'hora de determinar les diferències entre les propietats del terreny mesurades en la direcció horitzontal, amb el pressiòmetre, i les que requereixen la major part dels problemes de disseny, que es basen en propietats verticals. Com a tots els assaigs *in situ* i de laboratori, cal estandarditzar les tècniques d'instal·lació i els procediments d'assaig tant com sigui possible.



## 2.1 .- APARELLS PRESSIOMÈTRICS

Les diferents tècniques d'instal·lació donen lloc a tres grans grups de pressiòmetres:

- Amb perforació prèvia o *prebored* (PBP)
- Autoperforants (SBP)
- De penetració estàtica o *push in* (PIP)

### 2.1.1 .- Pressiòmetres amb perforació prèvia o *prebored* (PBP)

El pressiòmetre s'introdueix en una perforació feta expressament per a la realització de l'assaig. Cal distingir, però, entre dos tipus segons es mesuri el canvi de volum de la cel·la central o el desplaçament de la membrana.

El pressiòmetre de Ménard (MPM) és el cas més ben conegut d'assaig on es mesura el canvi de volum. Existeixen publicacions ben extenses sobre el mateix, Devincenzi i Frank [7]. La sonda Ménard consta d'una cel·la central de mesura saturada amb aigua i connectada a un dispositiu de mesura de volum en superfície, des d'on també s'aplica la pressió amb gas. Existeixen dues cel·les més, cel·les de guarda, amb la finalitat d'assegurar que la cel·la central és manté cilíndrica i així aconseguir mesurar l'expansió cilíndrica real de la cavitat. A tot aquest dispositiu se l'anomena sonda tricel·lular, essent la de Ménard l'única d'aquest tipus (Figura 3).

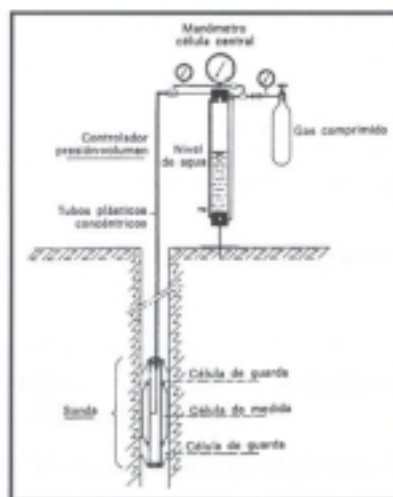


Figura 3.- Esquema de l'equip Ménard

En segon lloc apareixen les sondes d'una única cel·la també anomenades monocel·lulars, desenvolupades a finals dels anys 50 per l'empresa japonesa OYO Corporation (Figura 4). En aquests aparells, l'expansió de la membrana es mesura directament mitjançant transductors. Les membranes són bàsicament de cautxú, tot i que actualment s'està treballant amb materials com el poliuretà. La utilització d'aquests elements de mesura rau

en la problemàtica d'obtenir una informació acurada de l'expansió de la cavitat amb sistemes de mesura de volums. Aquest fet és particularment important en assaigs amb roca on els desplaçaments poden ser petits.

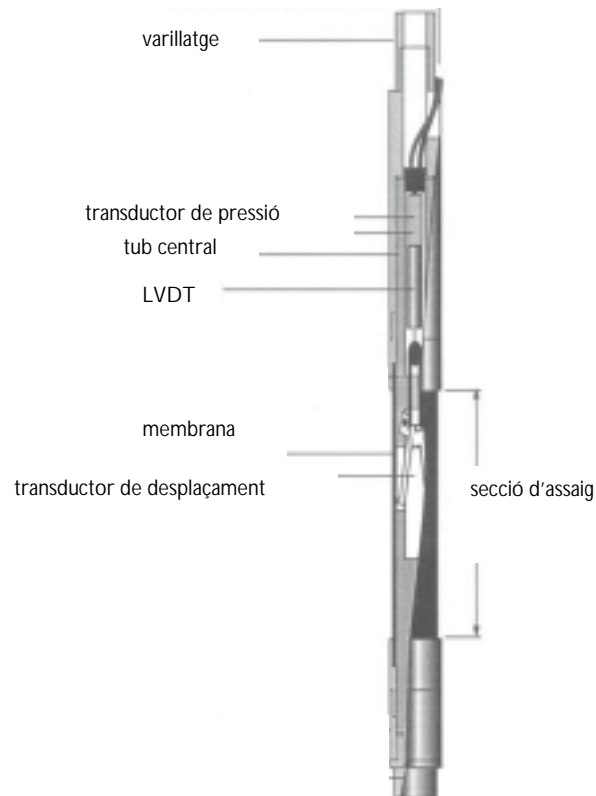


Figura 4.- Esquema d'un pressiómetre monocel·lular

Més actualment, cap als anys 80, es va desenvolupar el dilatòmetre d'alta pressió (Cambridge HPD). La seva finalitat és la realització d'assaigs en roca, sorres denses o argiles rígides. El desplaçament interior de la membrana es monitoritza amb sis braços de deformació que recullen la variació de diàmetre de la sonda en tres direccions.

Amb sondes com la Ménard, on es mesura el canvi de volum, l'assaig és, generalment, a tensió controlada, mentre que per a la resta de pressiómetres PBP es poden realitzar assaigs tant a tensió com a deformació controlada en sòls i roques si es disposa l'equip necessari.

La forma típica de les corbes d'un assaig PBP és la d'una S, tal com s'observa a la Figura 5. El tram inicial correspon a la fase de reajustament del terreny i inflament de la sonda. El segon tram correspon al tram elàstic de deformació que arriba fins al punt on s'inicia la fluència del terreny, i per tant el tercer tram, amb un comportament elastoplàstic.

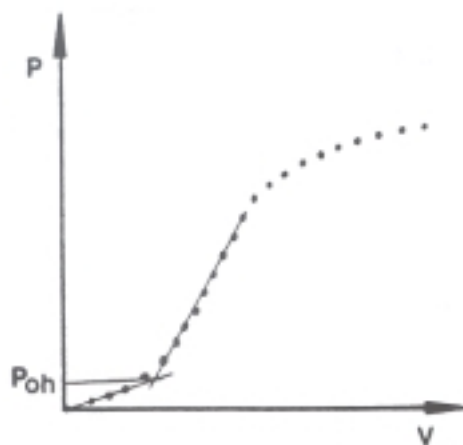


Figura 5.- Corba típica d'expansió d'un assaig PBP.

### 2.1.2 .- Pressiòmetres autoperforants o *self-bored* (SBP)

Aquest tipus de pressiòmetres es varen desenvolupar a finals dels anys setanta i els més coneguts són el Cambridge Self-boring Pressuremeter (CSBP), desenvolupat per Wroth i Hugues [8], el Weak Rock Self-boring Pressuremeter (RSBP), desenvolupat per Clarke i Allann [9] i el Pressiòmetre autoforeur (PAF), desenvolupat per Jézequel et al [2] i Baguelin et al [3]. Els dos primers són sondes de mesura del desplaçament, mentre que el tercer és de mesura de canvis de volum.

El principi del pressiòmetre autoperforant és la instal·lació de la sonda amb la mínima distorsió possible del terreny. Per a aconseguir-ho disposa d'un capçal de perforació amb rotació a l'extrem inferior de la sonda i rodejat per una canonada bisellada. El capçal es mou gràcies a un petit motor situat just a sobre d'ell. Generalment és necessària la injecció de llots o aigua per tal de facilitar la maniobra i la retirada dels detritus. A la Figura 6 es presenta un esquema de la sonda i un detall del capçal de perforació.

La determinació de la deformació amb el PAF s'obté de la mesura de volum d'oli o aigua bombejat a pressió dins la sonda per tal de produir el moviment de la membrana.

Pel cas del CSBP, l'expansió de la membrana, que en aquest cas és d'adiprè, es mesura mitjançant tres braços separats 120° i situats al tram central de la secció de mesura. Cada braç consta d'una biga que pivota sobre un punt i que provoca el moviment d'un ressort que proporciona la mesura de desplaçament.

Més actualment s'han trobat noves disposicions, entre les que destaca la de sis braços a 60° que mesura el canvi de diàmetre de la cavitat. El CSBP també disposa de transductors de pressió per tal de mesurar la pressió intersticial a la interfase membrana-sòl.

Finalment l'RSBP és una adaptació del CSBP per a poder perforar materials rocosos.

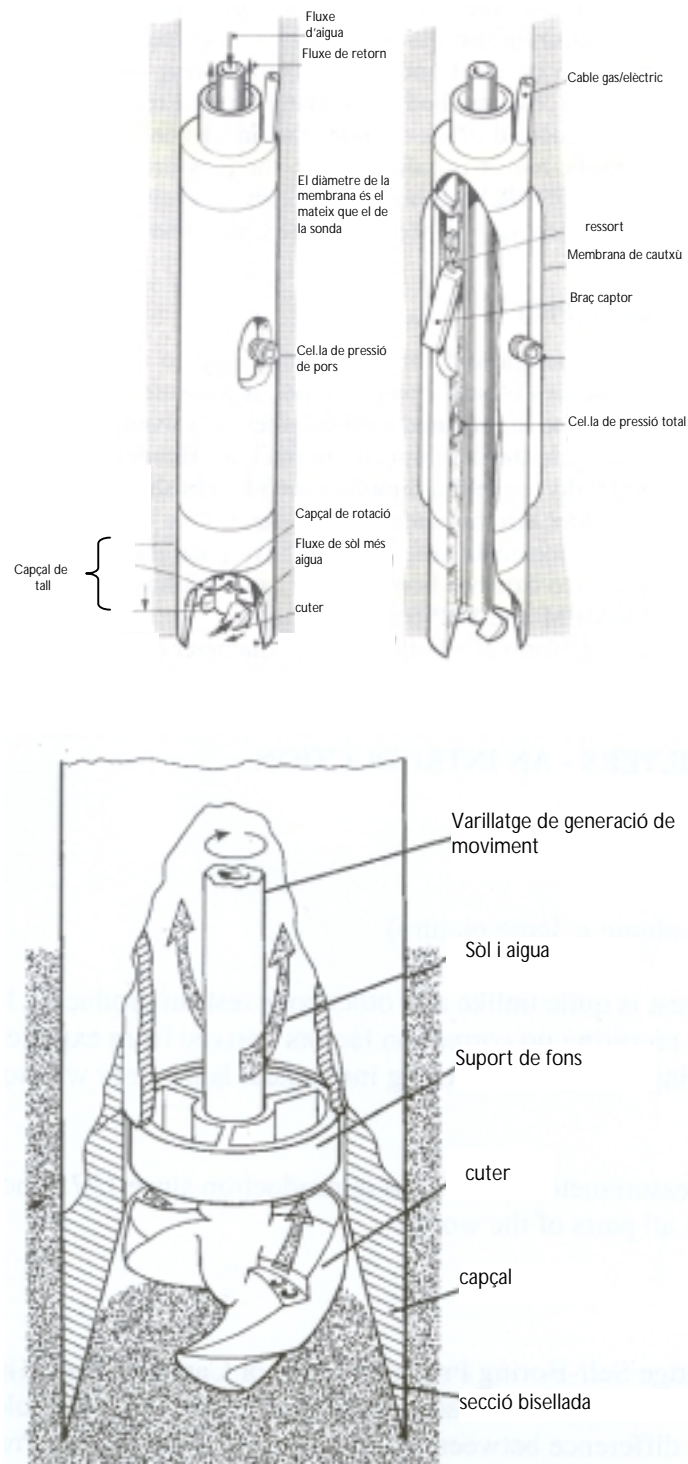


Figura 6.- Detall del pressiòmetre autoperforant i del capçal de perforació.

Donat que es pressuposa que la distorsió del terreny és mínima, la forma de les corbes pressiomètriques seran diferents. La fase d'acomodació no existirà i es suposa que la corba es començarà a separar del zero un cop comenci a superar la tensió horitzontal *in situ*. La forma característica d'aquestes corbes apareix a la Figura 7.

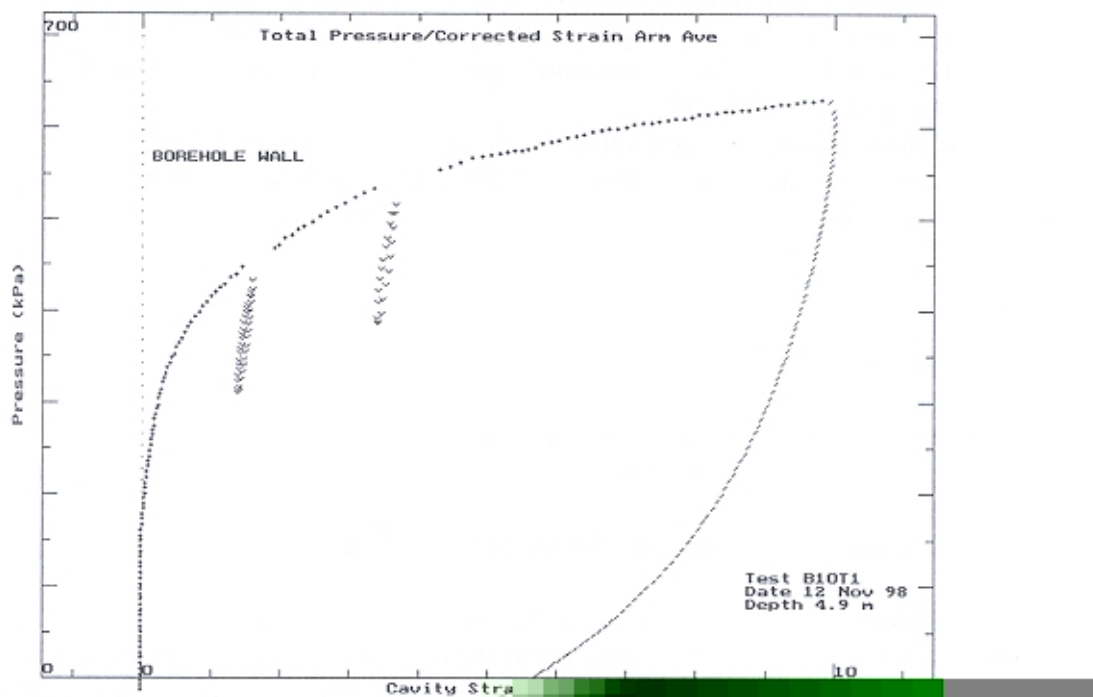


Figura 7.- Corba típica d'expansió d'un assaig SBP.

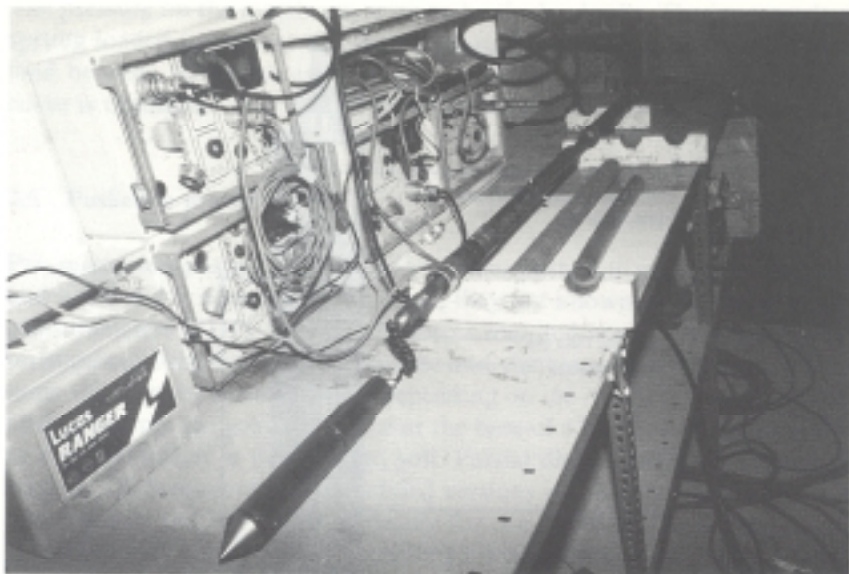
### 2.1.3 .- Pressiòmetres de penetració estàtica o *push in* (PIP)

Com el seu propi nom indica, es tracta de sondes pressiomètriques introduïdes dins el terreny mitjançant un sistema de clavament estàtic. Existeixen dos tipus de pressiòmetres de penetració estàtica, els de desplaçament parcial del terreny i els de desplaçament total, també coneguts com a *full displacement*.

Aquests elements són bàsicament puntes de piezocon amb una unitat pressiomètrica muntada just a sobre de la punta elèctrica. El principal problema d'aquest dispositiu és la distorsió que crea la introducció de la sonda dins el terreny, fins al punt que la corba que s'obté representa la resposta del terreny alterat durant la instal·lació.

La seva utilització queda limitada a materials on sigui possible la penetració estàtica.

A continuació es presenta una fotografia de l'aparell (Fotografia 1) i una corba tipus de resultats (Figura 8).



Fotografia 1.- Exemple d'un pressiòmetre push in.

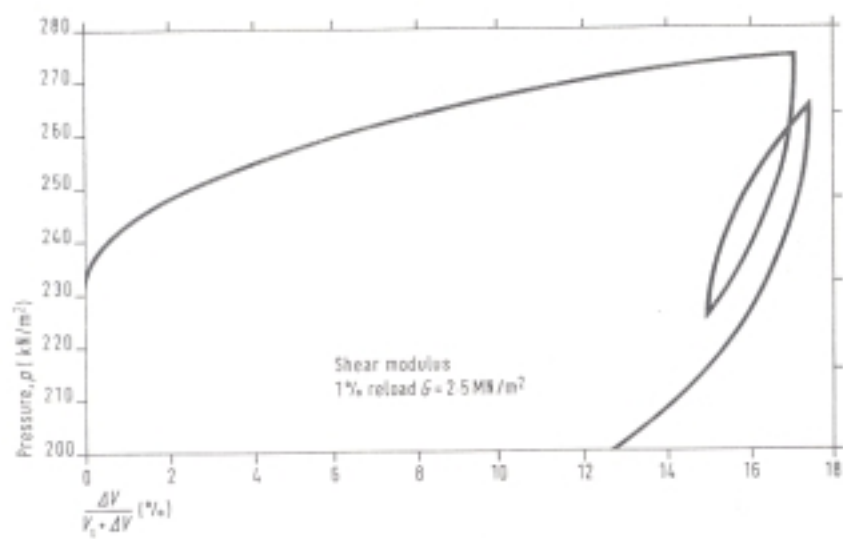


Figura 8.- Corba típica d'expansió.

## 2.2 .- CALIBRACIONS

---

Una calibració prèvia de l'aparell és molt important per a dotar de fiabilitat les mesures realitzades i obtenir la resposta real del terreny quan es faci l'assaig. El pressiòmetre s'ha de calibrar abans, durant i després de l'assaig. Les calibracions es poden dividir en tres grups (Clarke, [6]):

- a) Sistemes de mesura de pressió i desplaçament (manòmetres, transductors)
- b) Relatives a la sonda (rigidesa i compressibilitat de la membrana)
- c) Relatives al sistema (canvis de volum, compressibilitat del sistema)

### 2.2.1 .- Calibracions dels sistemes de mesura

#### Manòmetres de pressió

Els manòmetres generalment s'utilitzen per a mesurar la pressió de forma manual i generalment es calibren al laboratori abans d'anar al camp. S'usen en tots els pressiòmetres per saber la pressió que s'està aplicant o bé per calibrar els transductors de pressió.

#### Transductors de desplaçament

Els transductors de desplaçament o LVDT ( transformador diferencial per a variacions lineals) funcionen amb corrent altern i transformen un desplaçament o canvi de desplaçament en un canvi de magnitud elèctrica que posteriorment es podrà transformar en una mesura o registre. Es col·loca la sonda horitzontal i s'enfronta un dispositiu especial amb un micròmetre a cada punt de lectura sobre la sonda de manera individual, és a dir, es calibren els radis per separat.

S'ajusta el micròmetre pel desplaçament màxim del rang de treball i es prenen lectures del transductor. Típicament, aquestes lectures es fan cada 3-5% del rang total de treball. Si es vol una major precisió es poden fer mesures cada 0,1mm entre els 0 i 1mm de desplaçament i seguidament cada 0,5mm fins al desplaçament màxim. Les mesures es fan tant en increments com en decrements de desplaçament. Normalment el canvi en mV és lineal amb el desplaçament, presentant una lleugera histèresi (Figura 9). Si es supera un cert valor d'histèresi caldrà reajustar el transductor o canviar-lo si es repeteix l'error. La sensibilitat és de l'ordre del mV/mm.

És important que la sortida de voltatge total tant al zero com per a una sensibilitat mitjana dels transductors correspongui amb la que exigeix el sistema de control automàtic. Per exemple, pel cas del CSBP, amb una unitat de deformació controlada, un desplaçament del 1%/min correspon a 60mV/min, per tant cada braç de mesura hauria de canviar 20mV per cada 1% de deformació de la cavitat.

Si això no es complís s'haurien de realitzar els reajustaments pertinents als transductors d'acord amb les instruccions de fàbrica.

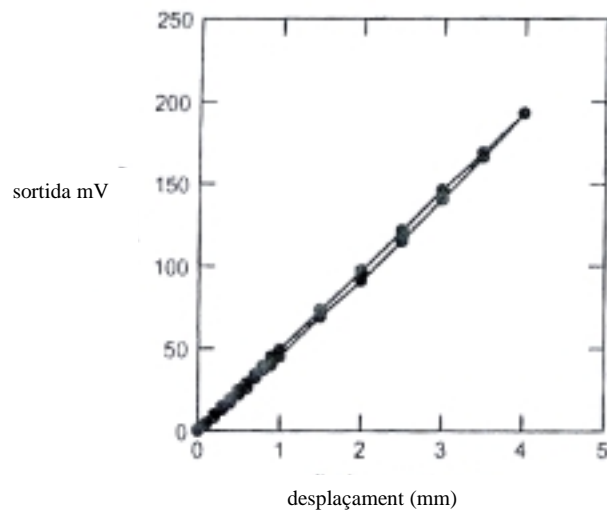


Figura 9.- Corba típica de calibració d'un transductor de desplaçament

### Transductors de pressió total

La filosofia és la mateixa que la dels transductors de desplaçament. La seva calibració es du a terme col·locant la sonda en una canonada tancada pels extrems. La pressió dins la sonda s'incrementa fins al valor màxim de lectura dels transductors. Normalment els increments de pressió són de l'ordre del 5% sobre el rang de treball. La relació entre la pressió i els valors de lectura és lineal tot i que presenta una lleu histèresi (Figura 10). La sensibilitat és de l'ordre del  $\text{mV}/0,01\text{kp}/\text{cm}^2$ . Si el rang de variació de la histèresi sobrepassa una determinada tolerància, i es confirma amb una segona prova, aleshores el transductor s'ha de substituir per un altre degudament pressuritzat. Es recomana triar els transductors de tal manera que la pressió màxima que s'assoleixi a l'assaig quedi dins el rang de treball del transductor.

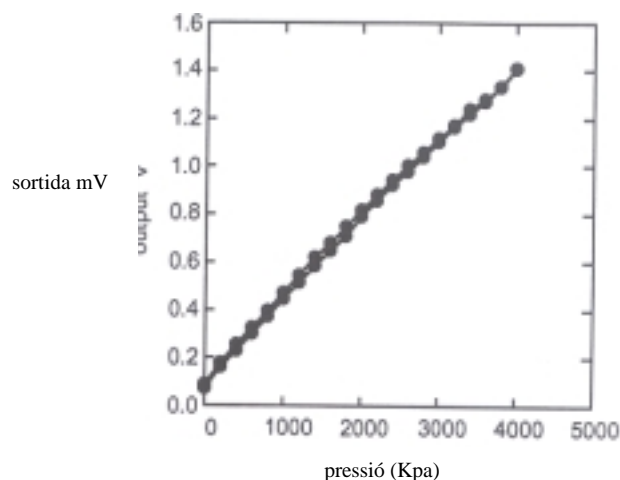


Figura 10 .- Corba típica de calibració d'un transductor de pressió



## 2.2.2 .- Calibracions de la membrana

La correcció de la membrana té dues components (Cambridge, [10]): la pressió per moure la membrana a partir d'una posició en repòs de la sonda i una segona component que depèn de l'expansió radial. A més a més, com que es pot considerar que la membrana no es comporta isotròpicament, és possible realitzar aquestes correccions de manera separada als punts on la sonda disposa d'elements de mesura de la deformació. A grans trets, aquestes calibracions de la membrana es poden separar en :

- a) Rigidesa de la membrana
- b) Compressibilitat de la membrana (que inclou la variació de gruix de la membrana)

### Rigidesa de la membrana

La rigidesa de la membrana és la pressió necessària per a botir la membrana (i la funda protectora si es disposa d'ella) a l'aire, sense confinament. La calibració s'ha de dur a terme en les mateixes condicions de temperatura que s'esperen que existeixin al terreny, perquè les propietats de la membrana depenen de la temperatura. Com que això sovint no és possible, es considerarà suficient apartar-ho del sol anotant, això sí, la temperatura ambient. La unitat de control i la sonda han d'estar al mateix nivell si el sistema de mesura de volum que s'utilitza es basa en el pes de fluid dins la mànega que aplica pressió a la membrana.

Les membranes noves s'han d'exercitar varies vegades abans de la calibració. La membrana es boteix i desboteix seguint una metodologia similar a la de l'assaig, ja sigui mitjançant un assaig de pressió controlada o de deformació controlada. Es prenen lectures de pressió i desplaçament fins arribar als valors màxims que s'assoliran en un assaig normal. Típicament, en assaigs de deformació controlada, on la membrana s'expandirà a un 1%/min, les lectures es faran cada 10s. Si, per contra, l'assaig és de tensió controlada, les lectures es fan al final de cada increment. Això resulta simple per a assaigs de deformació controlada on es cobreix el rang de deformació requerit, però pel cas de tensió controlada s'han de dur a terme moltes més calibracions a diferents rangs de pressió per tal d'assegurar que es cobreixin tots els rangs de deformació durant l'assaig. Tampoc és crític en la majoria d'assaigs donat que s'expandeix la membrana en increments equivalents al 10% de l'expansió màxima i es manté 1 minut cada increment.

La forma de la corba de calibració depèn del tipus de membrana, edat de la membrana, nombre d'assaigs realitzats per la membrana i la temperatura ambient. Essencialment consta de dos trams, un primer tram que correspon a la pressió requerida per separar la membrana del cos de la sonda, anomenada pressió de "*lift off*" en l'argot pressiomètric, i un segon tram que correspon a la pressió requerida per a que es doni l'expansió (Figura 11).

En les sondes on sobresurt la membrana del cos de la sonda, tal com la MPM, la pressió *lift off* és zero. En sondes tipus SBP aquesta pressió acostuma a ser inferior als 100KPa. Tot això depèn de la membrana i de si s'utilitza funda protectora. La corba d'expansió sovint és no lineal i, per a aquelles sondes que disposen de transductors de desplaçament independents, la resposta varia al voltant de la circumferència de la membrana.

Per a assaigs en argiles toves s'ha de tenir en compte la corba no lineal i la variació circumferencial a l'hora de deduir les dades. Els valors típics per a botir la membrana solen estar entre 0,5 i 1,5 kg/cm<sup>2</sup>. La rigidesa de la membrana es dona en kg/cm<sup>2</sup>/ % de deformació de la cavitat.

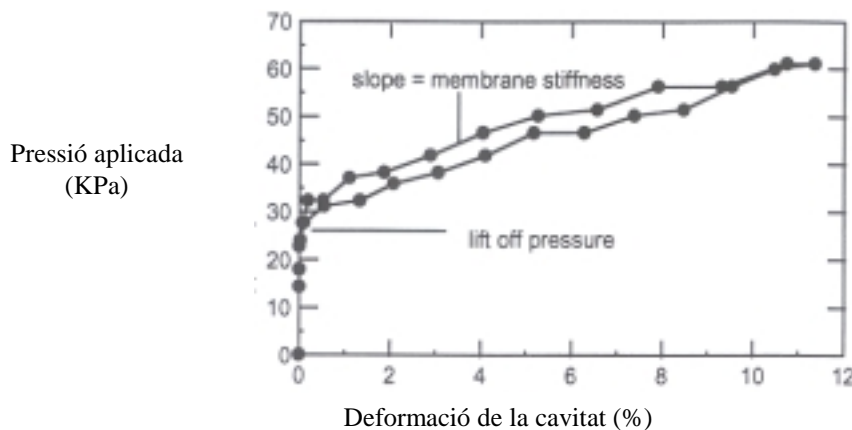


Figura 11.- Deformació que es produeix amb l'augment de pressió.

### Compressibilitat de la membrana

La compressibilitat de la membrana és el canvi de gruix de la membrana degut a un increment de pressió. Es podria haver tractat el gruix de la membrana en un apartat diferent però s'ha considerat que complementa a aquest, així que s'inclourà com a part de la compressibilitat de la membrana.

- **Gruix de la membrana:** és funció del canvi de pressió i del canvi de diàmetre de la membrana. Es pot calcular el desplaçament mitjançant àrees o bé mitjançant volums. En primer lloc es deduirà per volums. Es considera la membrana i la funda de la Figura 12.

El radi intern és igual al radi del cos de la sonda i és  $i_0$ . La membrana és  $t_0$  i per tant, el radi exterior en repòs és  $a_0 = (i_0 + t_0)$ . Quan s'incrementa la pressió, la membrana s'expandeix i el radi intern creix fins a  $i_i$  i el gruix es redueix fins a  $t_i$ , donant un nou radi exterior  $a_i$ . La longitud de la secció d'expansió de la membrana passa de  $l_0$  a  $l_i$  degut a l'expansió del final de la membrana.

El volum inicial de la membrana és  $Vm_0$  i, si la membrana és incompressible, aquest roman constant. Així doncs:

$$\left. \begin{aligned} Vm_0 &= (\pi a_0^2 - \pi i_0^2) \cdot l_0 \\ Vm_i &= (\pi a_i^2 - \pi i_i^2) \cdot l_i \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Aquestes dues expressions s'igualen per a una membrana} \\ \text{incompressible} \end{array}$$

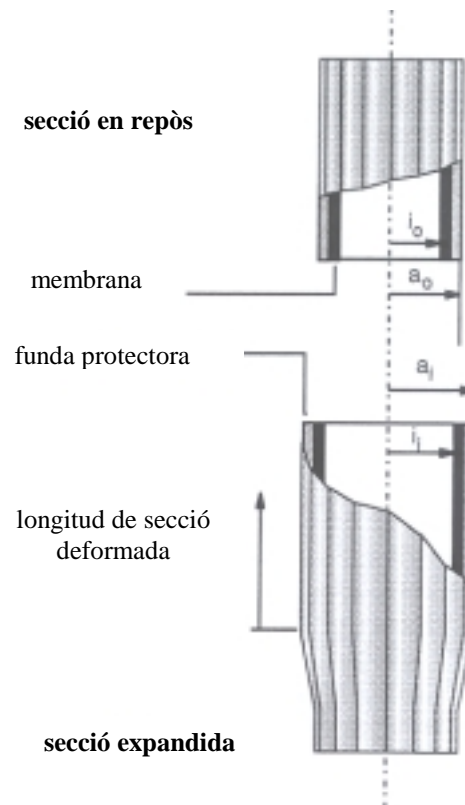


Figura 12 .- Deformació de la membrana sota pressió [6].

El canvi de longitud de la membrana és igual al canvi de diàmetre, que és aproximadament el doble del desplaçament mesurat ( $2d$ ):

$$l_i = l_0 + 2d \quad \text{i aleshores} \quad i_i = i_0 + d$$

La deformació mesurada de la cavitat ve donada per:

$$\varepsilon = \frac{d}{a_0} \text{ i l'actual a la paret del sondeig } \varepsilon_c = \frac{a_i - a_0}{a_0}$$

Així doncs, a partir d'aquestes expressions es pot arribar a una que doni el desplaçament exterior real de la membrana:

$$a_i = \left[ \frac{(a_0^2 - i_0^2) \cdot l_0}{l_0 + 2d} + (i_0 + d)^2 \right]^{1/2}$$

Si es repeteix aquest procés però treballant amb àrees s'arriba a la següent expressió :

$$(b - t)^2 - a^2 = [(b + E) - t]^2 - (a + d)^2$$

on  $a$  és el radi interior de la membrana en repòs  
 $b$  és el radi exterior de la membrana més la funda en repòs  
 $d$  és el moviment mesurat per l'LVDT  
 $E$  és l'expansió actual de la membrana  
 $t$  és el gruix de la funda d'acer .

D'aquesta manera, aïllant  $E$  s'obté el valor real del desplaçament.

Un últim mètode de determinació del canvi de gruix de la membrana es pot observar a la Figura 13 on apareix la relació entre el canvi de gruix i la pressió aplicada.

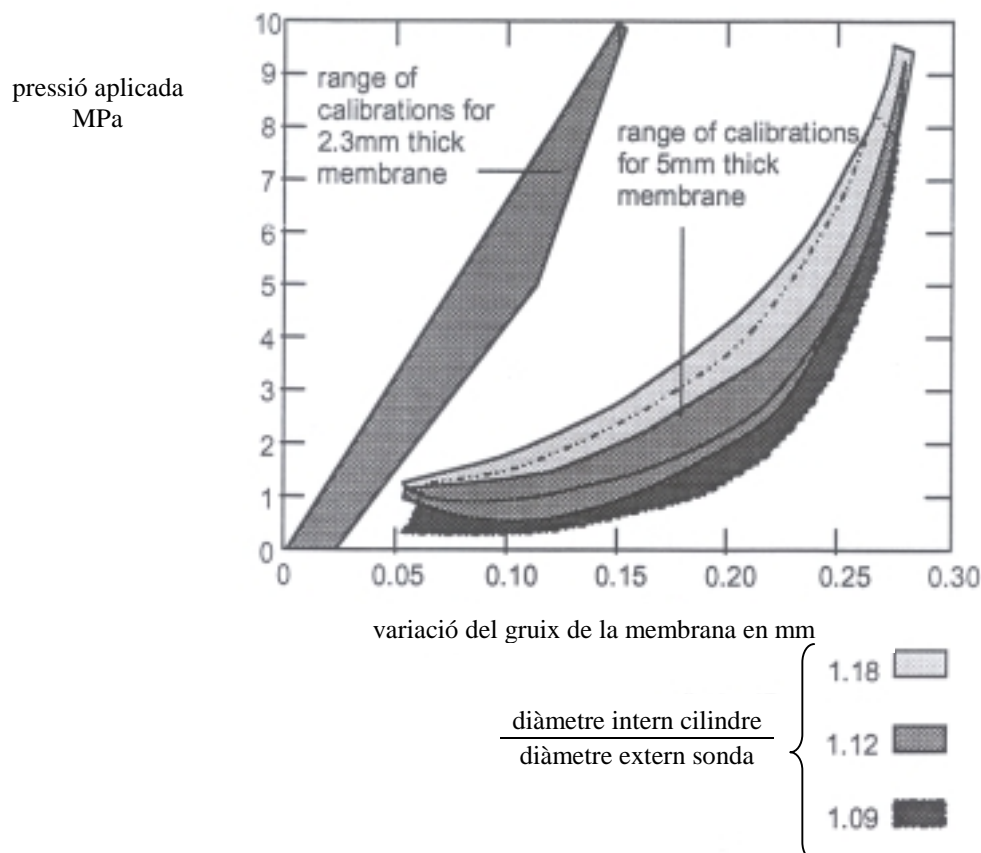


Figura 13 .- Àbac de relació entre la pressió aplicada i el canvi de gruix de la membrana (Clarke et al [6])

- **Compressibilitat de la membrana pròpiament dita:** el procediment habitual per a obtenir les dades de correcció de la compressibilitat de la membrana, es basa en botir la sonda a l'interior de diverses canonades d'acer, de propietats elàstiques conegudes i de diferents diàmetres.

Coneguts aquests diàmetres ( que generalment són 76, 80, 82 i 84 mm) es comparen amb els desplaçaments obtinguts a partir de la sonda, i es pot obtenir la corba de correcció.

Segons B. Celada y J.M.Galera [11] s'ha de començar per calcular la rigidesa de la canonada de calibració mitjançant la següent fórmula.

$$M_c = \frac{E}{1+\nu} + \frac{c^2 - b^2}{b(c^2 + (1-2\nu)b^2)}$$

on c = radi extern

b = radi intern

$\nu$  = coeficient de Poisson

E = mòdul de Young

Seguidament es pot obtenir la rigidesa combinada del sistema membrana-canonada,  $M_m$ , a partir del pendent de la corba de compressibilitat un cop la membrana entra en contacte amb la canonada de calibració (Figura 14)

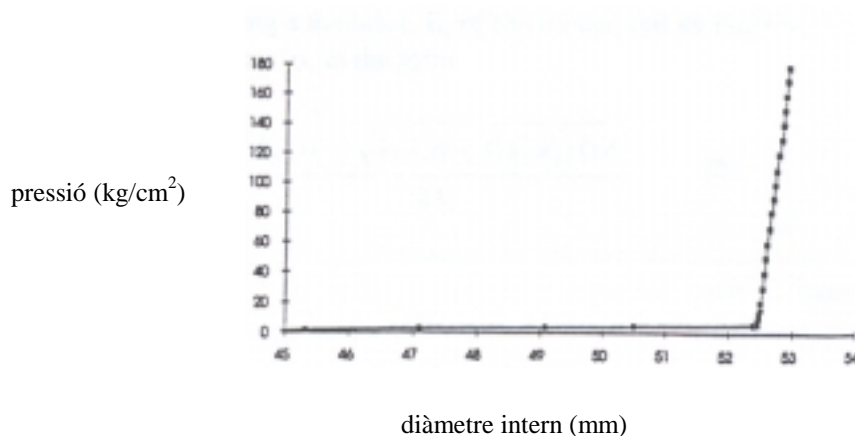


Figura 14 .- Corba de calibració de la membrana

Finalment es pot calcular la rigidesa de la membrana,  $M_s$ , com:

$$M_s = \frac{M_c \cdot M_m}{M_c - M_m}$$

Així doncs aquest mètode de interpretació es basa en la determinació de les propietats elàstiques de la membrana a partir d'assaigs de calibració

Altres autors com Clarke [6] opten per una calibració a partir de les canonades, botint la sonda a l'interior d'una canonada fins a un màxim i després es redueix en un 20% d'aquest màxim i es realitza increments de pressió com en un assaig normal, prenent mesures de desplaçament i de pressió en els intervals escollits. S'obtindran tantes corbes de correcció com cilindres s'hagin fet servir. Considera que aquesta compressibilitat no és del tot correcta, perquè el cilindre també es pot expandir lleugerament per a determinats rangs de pressió, però donat que aquesta expansió és molt petita comparada amb la compressió de la membrana es pot ignorar.

D'altra banda, Cambridge [10] considera que existeixen efectes més significants que la compressibilitat de la membrana com poden ser l'efecte de la pressió sobre els braços de mesura o bé la deformació de propi aparell com a resultat de la pressió interna aplicada.

### **2.2.3 .- Calibracions del sistema**

#### **Compressibilitat del sistema**

Les calibracions que s'han comentat en els apartats anteriors no tenen sentit en sondes amb sistema de mesura de volums. Per contra s'ha de determinar la compressibilitat del sistema. Aquesta inclou els canvis de volum de la sonda, les línies de connexió entre la sonda i la superfície i la unitat de control en superfície. La seva realització és la mateixa que la compressibilitat de la membrana. S'introdueix la sonda en una canonada i es boteix al màxim, mesurant volums. S'ha d'anar amb compte perquè la unitat de control mesura increments de volum.

### 3 .- INSTAL·LACIÓ

La instal·lació de la sonda tindrà un efecte significant sobre la forma de la corba pressiomètrica i per tant sobre els paràmetres que se'n dedueixen. Idealment, s'hauria de dissenyar una tècnica de perforació adient per tal de minimitzar la distorsió del terreny circumdant. Existeixen taules que indiquen el tipus de pressiómetre recomanable per a cada tipus de terreny. Un exemple apareix a la Taula 1.

La sonda pressiomètrica ha de quedar instal·lada en una determinada secció de la perforació on es realitzarà l'assaig. Aquesta es pot situar baixant mecànicament amb el varillatge de la màquina de perforació, perforant al mateix temps que avança o bé amb clavament estàtic.

Taula 1 (Clarke et al ,[6])

Tipus de terreny	PBP	SBP	PIP
argiles toves	A	A	A
argiles rígides	A	A	A
sorres poc denses	B amb suport	A	A
sorres denses	B amb suport	B	C
Graves	C	N	N
roca tova	A	B	N
roca dura	A	N	N

A- molt adient; B- adient; C- moderat; N- no recomanable.

Observant aquesta taula i com a metodologia general, les sondes PBP s'acostumen a fer servir amb qualsevol tipus de sòl o roca que mantingui les parets de la perforació estables, ja sigui amb l'ajuda o no de llots de perforació. Les sondes SBP s'usen amb sòls que presentin una quantitat petita de graves o roques toves. Finalment, les sondes PIP només es poden utilitzar amb terrenys que permetin la intrusió estàtica de la mateixa.

A continuació es presenta la problemàtica de cada uns dels mètodes de perforació de les diferents sondes.

#### 3.1 .- Pressiómetres amb perforació prèvia (PBP)

Aquests pressiómetres es baixen dins un sondeig previ, per tant és inevitable l'alteració del terreny que envolta la perforació. Les causes més comuns d'aquesta alteració són:

1. *Canvi en les tensions totals in situ.* La formació del sondeig provoca una reducció de les tensions donat que el terreny ha sigut remogut. Aquest canvi depèn del sosteniment utilitzat a l'hora de perforar. La tensió a les parets del sondeig serà nul·la o igual a la pressió del llot de perforació.

2. *Col·lapse del sondeig.* Si la reducció de les tensions totals és prou gran, es pot produir un trencament del terreny per tracció o extensió. Aquest fet es veu afavorit per la presència de discontinuïtats.
3. *Erosió de les parets del sondeig.* Les parets del sondeig poden patir erosió al pas de les diferents maniobres de perforació, especialment si s'utilitzen llots.
4. *Relaxació de les parets del sondeig.* Es pot considerar com una reducció de pressió de pors del terreny adjacent. Aquest fet pot ocasionar un augment de la pressió de succió que, en presència de fluid de perforació, pot reduir la pressió de pors causant l'inflament del terreny i la conseqüent relaxació del mateix.
5. *Distorsió mecànica.* la intrusió del capçal de perforació i de les respectives canonades d'extracció de testimoni alteren les parets del sondeig, ja sigui per vibració o per càrregues excèntriques.

En funció del tipus de terreny, la importància d'aquests factors varia. Seria convenient dissenyar o proposar una determinada perforació pensant en la realització de l'assaig, però en la vida real aquesta actuació és una utopia.

Al marge d'això, si no es pot triar el tipus de perforació, el que sí s'ha de fer és minimitzar la seva influència amb un sondeig de bona qualitat.

Com a regla general, per a assaigs en sòls, el diàmetre de la perforació, ha de complir la següent relació :

$$\frac{D_s}{D_{es}} < 1,10$$

on  $D_s$  és el diàmetre del sondeig i  $D_{es}$  és el diàmetre exterior de la sonda. Generalment, la perforació tendeix a sobreexcavar una mica el sondeig projectat. Ara bé, si es sobrepassa el límit anterior, la validesa dels resultats depèn de la capacitat expansiva de la sonda pressiomètrica. En roques es poden acceptar rangs majors de sobreexcavació perquè el límit d'expansió de la roca és menor.

Finalment, una prova evident de la correcta realització de l'assaig és la corba d'expansió pressiomètrica ( **Figura 15**).



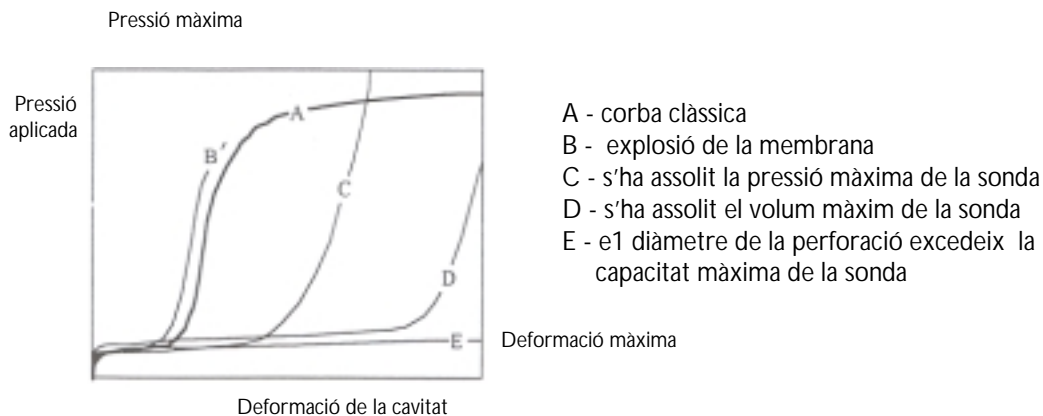


Figura 15.- Exemple de corbes en diferents situacions

### 3.2 .- Pressiòmetres autoperforants (SBP)

L'atractiu d'aquestes sondes rau en la possibilitat de realitzar assaigs sobre terrenys poc alterats, gràcies a un dispositiu de perforació incorporat a la mateixa sonda. Si bé existeixen diversos sistemes de perforació, els més utilitzats són els que disposen d'un capçal tallant rotatiu a l'extrem inferior ajudats d'un sistema d'injecció basat en la fractura hidràulica.

Malgrat que l'alteració del sondeig és menor cal tenir especial cura de:

1. *Posició del cutter (capçal tallant).* S'ha d'optimitzar la seva posició en funció del tipus de terreny a perforar.
2. *Dimensions del capçal de tall.* Teòricament hauria de tenir el mateix diàmetre que el pressiòmetre, però en ocasions es precisa una mica de sobreexcavació en argiles rígides i roques toves.
3. *Índex de perforació.* Afecta directament a la força que s'ha d'aplicar al varillatge, a la posició del cutter i al flux que s'ha de bombejar per tal d'extreure el material. La pressió d'aquest flux depèn de la profunditat de l'assaig i de la viscositat del mateix. S'ha d'evitar que la sonda quedi encallada a la perforació. Aquest índex de perforació s'ha de regular per tal de no produir un excés de pressió massa significant al voltant de la sonda.
4. *Vibracions excessives.* Poden produir, a més a més d'una alteració excessiva, la pèrdua de la sonda per descargolament del varillatge, sobretot si es treballa a grans profunditats.

La utilització del SBP està condicionada pel tipus de material que es trobi, podent catalogar-lo segons la resistència del material, la tensió horitzontal i el tamany de les partícules. Així doncs, només serà capaç de perforar sòls on el tamany de partícules no arribi a la grava i en algunes roques toves.

En el cas de que els materials siguin argiles, es pot generar un excés de pressió intersticial. Resulta preferible deixar dissipar aquesta sobrepressió abans de realitzar l'assaig, sobretot si es volen prendre mesures de la pressió de pors.

### 3.3 .- Pressiòmetres de penetració estàtica (PIP)

El con pressiomètric es va desenvolupar principalment per treballar en geotècnia *offshore*, si bé actualment també es pot utilitzar en *onshore*. La mecànica d'inserció al terreny de la sonda és la mateixa que la del piezocon, clavament estàtic des d'un camió que aplica la força necessària. Idealment, la velocitat de penetració és de  $2\text{cm/s}^4$  i la seva utilització es limita a materials tous. El con pressiomètric és més llarg que el convencional donat que disposa del capçal CPT/CPTU i a sobre del mateix la sonda pressiomètrica.



Fotografia 2 .- Detall d'un camió de clavament estàtic .

---

<sup>4</sup> S'accepta que aquesta velocitat d'execució dóna lloc a una penetració no drenada en argiles i drenada en sorres.

## 4 .- METODOLOGIA D'ASSAIG

---

### 4.1 .- Introducció

Es considera que l'assaig comença quan varia la pressió sobre la membrana o bé aquesta es mou. Idealment, la membrana s'ha d'expandir lo suficient per a poder assajar el sòl no afectat per la perforació. Es prenen dades del desplaçament de la membrana i de la pressió necessària per assolir aquest nivell inalterat amb les quals es realitzaran les corbes tensió-deformació.

Existeixen diversos mètodes o recomanacions de realització de l'assaig per als diferents tipus de sonda, com per exemple el mètode Ménard, ASTM D4719-87, LCPC, ISRM, Mair i Wood [4], Clarke i Smith [12], NFP 94 i GOST 20276-85.

Generalment es poden dividir els assaigs en assaigs de tensió controlada o bé de deformació controlada, en funció de la sonda i del sistema de control.

Per a sondes que mesuren el canvi de volum de la cel·la central, l'assaig és a tensió controlada. D'altra banda, per a sondes que mesuren el desplaçament de la membrana es pot realitzar l'assaig tant a tensió controlada com a deformació controlada, depenent bàsicament de la disponibilitat de sistemes automatitzats.

Idealment, s'ha de poder carregar la membrana fins a assolir el desplaçament màxim o bé la pressió màxima. En sòls, generalment, l'assaig finalitza quan s'assoleix el desplaçament màxim, mentre que en roques finalitza en arribar a la pressió màxima. Quan als assaigs finalitzats s'arriba a un percentatge de deformació petit, pot ser degut a:

1. S'ha assolit la pressió màxima de la sonda i aquesta és insuficient per portar el terreny a fluència. Això és comú en assaigs en roca.
2. La membrana explota degut a algun dany produït durant la instal·lació de la sonda o bé per la presència de discontinuïtats al terreny.
3. S'ha assolit el volum màxim de la sonda degut a una expansió no uniforme.
4. La perforació està sobredimensionada degut a les dificultats de perforació.

### 4.2 .- Assaig Ménard

Es tracta d'un cas concret d'assaig a tensió controlada. La metodologia Ménard avarca l'expansió i la deformació assolida, que idealment hauria de ser igual al doble de la secció inicial. S'utilitza per a obtenir els paràmetres de disseny a partir de les mesures d'increment de volum de la cel·la central.

El pressiómetre es baixa pel sondeig, solidari al varillatge de perforació, i es situa a la secció d'assaig. S'expandeix la sonda amb uns 10 o 14 increments iguals de pressió, els quals es mantenen durant 1 minut, prenent lectures cada 30 i 60 segons. Amb aquestes dades ja s'està en condicions de representar la corba d'expansió i extreure els paràmetres pertinents.

### 4.3 .- Assaigs amb tensió controlada

La filosofia d'un assaig amb tensió controlada és la mateixa que la de l'assaig Ménard, s'apliquen increments de pressió a determinats intervals de temps. Ara bé, la principal diferència és el nombre d'increments, els intervals de temps i la inclusió de cicles de càrrega/descàrrega<sup>5</sup>.

Briaud [13] va proposar que els increments fossin de  $p_i/10$  i que es mantinguessin durant 1 minut. Aquest mètode és el conegut per l'ASTM. Mair i Wood [4] varen suggerir que el nombre d'increments de càrrega havia d'estar entre els 15 i 20. Típicament els increments varien entre 0,15 bar per argiles toves, 1 bar per a argiles rígides o sorres denses i cap 5 bar per a roques dèbils. L'assaig normalment es controla manualment mitjançant un sistema de regulació de gas (nitrogen) que exerceix pressió sobre el fluid de les conduccions, fent d'efecte pistó. Tot el sistema de conduccions i la sonda han d'estar degudament saturats.

Amb tot el dispositiu preparat s'aplica el primer increment. S'anoten els canvis de volum o de desplaçament per cada graó, mantenint la pressió constant. Mair i Wood [4] varen proposar aplicar increments de pressió cada 2 minuts. La normativa russa (GOST 20276-85) diferencia entre assaigs ràpids i assaigs lents de tensió controlada, determinant el temps que s'ha de mantenir cada increment de pressió (0,25 bar) en funció del tipus de material. Al final de cada increment de pressió és possible realitzar un cicle de càrrega/descàrrega.

La ISRM recomana un mètode de tensió controlada en el que la pressió augmenti com a mínim amb cinc intervals iguals fins al màxim. Aquest assaig està destinat a roques raó per la qual la capacitat màxima de la sonda és similar al límit de l'assaig. No dona intervals de mesura, però suggereix que s'ha de mantenir la pressió o el volum constant només si s'han de prendre mesures de la dilatació. La pressió màxima s'ha de mantenir 10 minuts. Per tal d'obtenir les propietats de rigidesa de la roca, s'han de realitzar tres cicles de càrrega/descàrrega.

### 4.4 .- Assaigs amb deformació controlada

L'assaig de deformació controlada ideal és aquell on la membrana s'expandeix amb un rang de desplaçament constant. Això resulta relativament simple si s'utilitzen sistemes saturats de fluid. S'injecta una quantitat coneguda d'aigua o oli dins la membrana. Briaud et al [13] va suggerir que cada increment de volum,  $V_0/40$ , s'havia de mantenir durant 15s. La pressió s'anota al final de cada graó. Aquest procediment es pot dur a terme amb qualsevol sonda saturada amb fluid i amb qualsevol tipus de condicions del terreny.

Ara bé, si el sistema està saturat amb gas resulta més complicat donat que disposa de transductors de desplaçament. És necessari disposar d'un sistema de control feedback, és a dir, si el rang d'expansió és menor al requerit, s'obre una vàlvula que permet la injecció de gas dins la sonda. Per contra, si el grau d'expansió és superior al desitjat, s'obre una altra vàlvula que permet expulsar gas a l'exterior. S'han estipulat uns límits tant de pressió com de deformació, que es mouen entre 2,5 i 40Kpa/min i 0-2%/min respectivament. Si fos necessari es podrien canviar al llarg de l'assaig.

---

<sup>5</sup> Aquests cicles són de difícil realització, si no impossibles, en sistemes volumètrics.

S'acostuma a fer servir un rang de deformació d'un 1%/min. Els valors que donen els transductors de desplaçament es monitoritzen per poder comparar-los amb els valors predeterminats. Si el grau d'expansió no fos el predeterminat es reajustaria la pressió (feedback), ja sigui manual o automàticament.

L'assaig amb deformació controlada presenta una desavantatge. Mentre dura la càrrega en la fase elàstica, el terreny respon molt poc degut al canvi de pressió. D'aquesta manera, s'obtenen massa dades si l'interval de mesura no és l'adequat. Un cop s'arriba a la fluència del terreny, l'assaig esdevé inestable si no es disposa d'un dispositiu feedback que respongui amb la suficient rapidesa per reajustar la pressió.

Per solucionar aquest problema, s'ha adoptat un compromís raonable de realització de l'assaig, primer amb tensió controlada durant la fase elàstica i un cop el terreny comença a fluir s'adopta un assaig amb deformació controlada.

El rang de tensió controlada dependrà del tipus de sòl a estudiar, anant de 0,2 bar/min, per a terrenys tous, fins a 4 bar/min per a terrenys rígids (Clarke, [6]). Mair i Wood [4] consideren que han d'existir un mínim de sis punts en la fase elàstica, entre  $p_0$  i  $p_f$ . A més a més, per a assaigs en argiles aconsellen increments de pressió de  $Cu/6$ , on  $Cu$  és la resistència al tall no drenat.

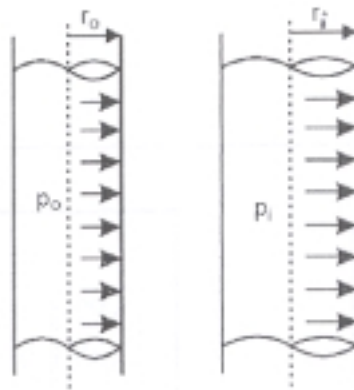
El rang de deformació depèn del tipus d'assaig. Per a assaigs no drenats en argiles usualment s'utilitzen rangs d'un 1%/min, essent aquest el valor més utilitzat en tota la literatura sobre el tema. Les lectures es poden fer cada 10 o 20 s, tot i que generalment es fan cada 20 s per reduir el nombre de dades. Algunes unitats de control imposen una restricció addicional de deformació màxima permesa, per tal de prevenir una sobreexpansió accidental de la membrana.

## 5 .- ANÀLISI DE L'ASSAIG PRESSIOMÈTRIC

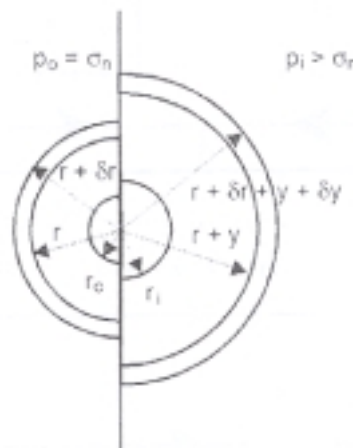
L'assaig pressiomètric s'assumeix com l'expansió d'una cavitat cilíndrica, el comportament de la qual està àmpliament documentat ([4], [6], [14]). Es suposen les següents hipòtesis:

- la cavitat és infinitament llarga (la longitud és molt més gran que el radi) i els desplaçaments es produeixen en la direcció radial.
- el material circumdant a la perforació està sotmès a deformació plana. No existeix deformació en la direcció paral·lela a l'eix de la cavitat.
- Les tensions radial ( $\sigma_r$ ), circumferencial ( $\sigma_\theta$ ) i axial ( $\sigma_v$ ), són les tensions principals.

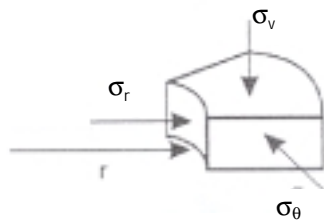
La geometria del problema i el sistema de coordenades utilitzat apareixen a la Figura 16.



a .- Expansió d'una cavitat cilíndrica



b .- Expansió d'una secció de radi r.



c .- Distribució de tensions en un element de radi r.

Figura 16 .- Definicions utilitzades en l'anàlisi d'expansió d'una cavitat cilíndrica.

## 5.1 .- Solucions elàstiques en un medi isotròpic

### Expansió d'un cilindre de paret gruixuda

L'equació d'equilibri del problema d'una cavitat cilíndrica expressada en termes de tensió radial i circumferencial és :

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + (\sigma_r - \sigma_\theta) = 0$$

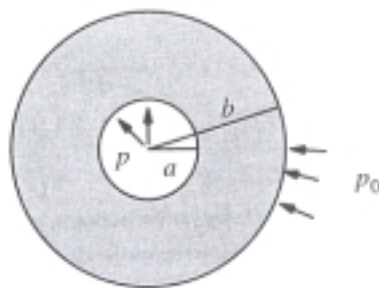


Figura 17.- Cavitat sota pressió uniforme exterior i interior.

on  $\sigma_r$  i  $\sigma_\theta$  són les tensions normals actuant en la direcció radial i tangencial respectivament. Les condicions de contorn es poden escriure com:

$$\sigma_r|_{r=a} = p \quad \text{i} \quad \sigma_r|_{r=b} = p_0$$

Les deformacions radial i tangencial són:

$$\varepsilon_r = -\frac{du}{dr} \quad \text{i} \quad \varepsilon_\theta = -\frac{u}{r}$$

les quals es poden utilitzar per a eliminar el desplaçament  $u$  i obtenir la següent equació de compatibilitat:

$$\varepsilon_r = \frac{d}{dr}(r\varepsilon_\theta)$$

Per a materials amb comportament elàstic, les relacions tensió-deformació per al cas de deformació plana d'una cavitat cilíndrica són:

$$\varepsilon_r = \frac{1-\nu^2}{E} \left[ \sigma_r - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_\theta \right] \quad \text{i} \quad \varepsilon_\theta = \frac{1-\nu^2}{E} \left[ -\frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r + \sigma_\theta \right]$$

on  $E$  és el mòdul de Young i  $\nu$  el coeficient de Poisson.

Combinant les equacions d'equilibri, compatibilitat i les relacions tensió-deformació s'obté una equació diferencial en termes de tensió radial que presenta la següent solució:

$$\sigma_r = C + \frac{D}{r^2} \quad \text{i} \quad \sigma_\theta = C - \frac{D}{r^2}$$

on  $C$  i  $D$  són constants que s'obtenen d'aplicar les condicions de contorn. Pel cas concret d'un medi infinit, les solucions d'expansió d'una cavitat són:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= p_0 + (p - p_0) \left( \frac{a}{r} \right)^2 \\ \sigma_\theta &= p_0 - (p - p_0) \left( \frac{a}{r} \right)^2 \\ u &= \frac{p - p_0}{2G} \left( \frac{a^2}{r} \right) \end{aligned}$$

on  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  (o  $G = V \frac{dp}{dV}$ ) és el mòdul de tall del material.



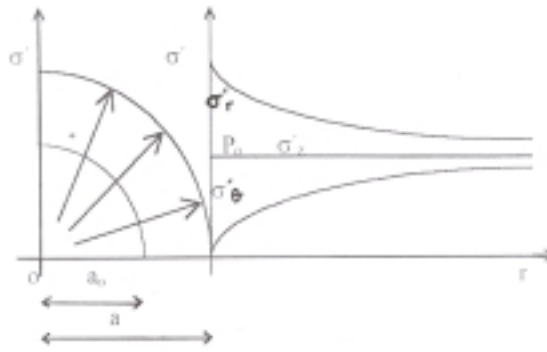


Figura 18.- Distribució de tensions en la direcció radial.

La deformació de la cavitat es pot expressar doncs com:

$$\varepsilon_c = \frac{(a - a_0)}{a_0}$$

## 5.2 .- Solucions elastoplàstiques perfectes

A l'inici de la fluència, a les parets de la cavitat, es produeix un canvi de comportament com a resultat d'un excés de pressió intersticial (expansió no drenada) o bé com a canvis de volum a l'interior del terreny (expansió drenada). A la pràctica, tots els assaigs seran total o parcialment drenats, però a l'hora de desenvolupar l'anàlisi s'assumeix que l'assaig és completament drenat o completament no drenat.

Sota càrrega no drenada, els sòls cohesius s'acostumen a modelar a partir de l'anàlisi en tensions totals i utilitzant el criteri de ruptura de Tresca. D'altra banda, el comportament drenat de les sorres es modela a partir de l'anàlisi en tensions efectives, utilitzant el criteri de ruptura de Mohr-Coulomb.

### 5.2.1 .- Expansió no drenada d'una cavitat cilíndrica

Per a un pressiómetre introduït sense distorsió dins un material cohesiu amb comportament elastoplàstic perfecte, la pressió inicial de la cavitat ha de ser la tensió horitzontal total in situ,  $\sigma_{h0}$ . A mesura que s'incrementa la pressió, la resposta inicialment serà elàstica amb petites deformacions i sense canvis de volum.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta p}{G}$$

La fluència es produirà quan la tensió de tall a les parets de la cavitat assoleixi la resistència al tall no drenada,  $C_u$ . Això succeeix quan:

$$p = \sigma_{h0} + C_u$$

La deformació volumètrica a l'inici d'aquesta fase serà:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{C_u}{G}$$

A mesura que la pressió sobre la cavitat supera el valor de la fluència, es desenvolupa un anell de sòl plastificat al voltant de la cavitat fins a una distància, que podem denominar radi plàstic, a partir de la qual la resposta continua essent elàstica. L'argila que es deforma plàsticament no té resistència al tall, i si no fos pel sòl elàstic circumdant es deformaria infinitament. En aquesta fase es compleix:

$$p = \sigma_{h_0} + C_u \left[ 1 + \log_e \frac{G}{C_u} \right] + C_u \left[ \log_e \left( \frac{\Delta V}{V} \right) \right]$$

assolint el valor màxim a

$$p_L = \sigma_{h_0} + C_u \left[ 1 + \log_e \left( \frac{G}{C_u} \right) \right] \quad \text{o bé} \quad p = p_L + C_u \log_e \left( \frac{\Delta V}{V} \right)$$

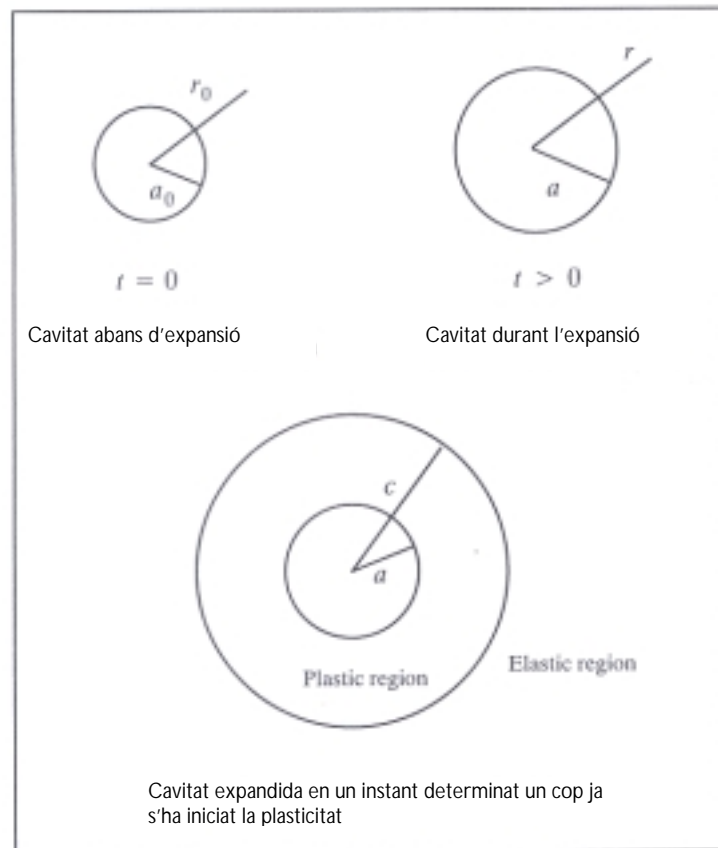


Figura 19.- Dinàmica de l'expansió d'una cavitat.

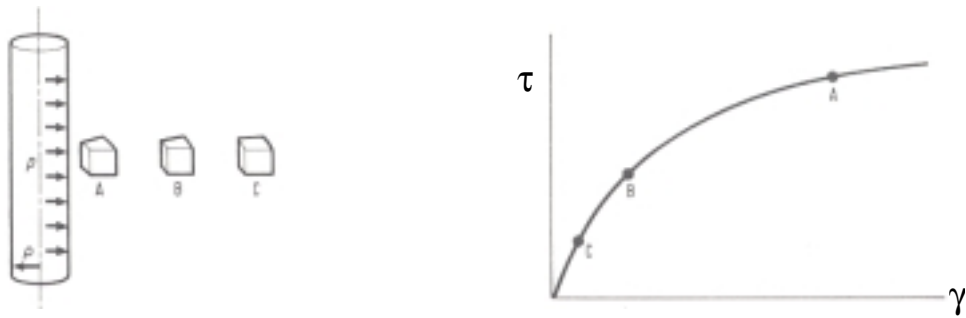


Figura 20.- Relació tensió de tall ( $\tau$ ) deformació de tall ( $\gamma$ ) per a diferents elements de terreny situats a diferents distàncies de la cavitat.

### 5.2.2 .- Expansió drenada d'una cavitat cilíndrica

Representa l'anàlisi típic per a sòls granulars donat que no es generen excessos de pressió intersticial. El volum al voltant d'una cavitat d'aquest material varia i si no es té en compte aquest efecte les interpretacions poden conduir a error. Els canvis de volum que es donen en sorres s'han interpretat de diferents maneres per diversos autors que inclouen observacions experimentals i la teoria de la tensió de dilatància de Rowe [15]. El mètode més àmpliament utilitzat és el de Hughes et al [16] i Manassero [17] que presenta les següents hipòtesis:

- S'ignoren les deformacions elàstiques perquè són despreciables en relació a les deformacions plàstiques.
- Quan es produeix la fluència s'assumeix un comportament de la sorra en deformació plana governat per la teoria de la dilatància de Rowe.

### 5.2.3 .- Anàlisi general

S'assumeix el criteri de trencament de Mohr-Coulomb (Figura 21), amb un angle de fregament intern mobilitzat  $\phi'$ .

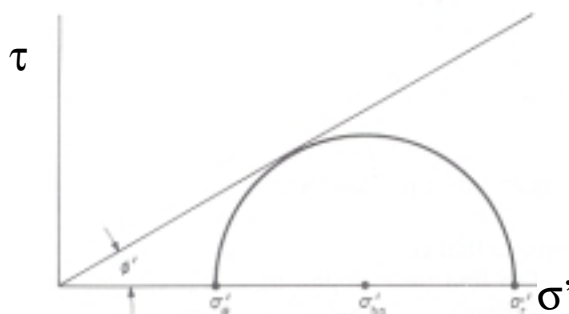


Figura 21.- Criteri de trencament de Mohr-Coulomb.

Quan es dona la fluència, s'assumeix que el problema queda governat per la teoria de la dilatància de Rowe. El coeficient de tensions  $K(=\sigma_r/\sigma_v)$  variarà amb la deformació de tall. El coeficient de tensions efectives per a un radi donat variarà en funció de la densitat de la sorra i del radi de la cavitat expandida. Això serà funció del canvi de volum dins la sorra, que es poden expressar en funció de l'angle de dilatància,  $\Psi$ , que es defineix per:

$$\sin \Psi = -\frac{d\varepsilon_v}{d\gamma}$$

El canvi de volum dependrà de la densitat de la sorra. Si és solta, la sorra es comprimirà, i si és densa, la sorra dilatarà. Existeix una densitat particular per la qual no es donen variacions de volum. La fricció mobilitzada per a aquesta densitat es coneix com l'angle de fregament intern a volum constant,  $\phi_{cv}$  i el coeficient de tensió de trencament per a aquesta densitat és  $K_{pcv}(=\sigma_r/\sigma_v)$ .

$$K_{pcv} = \frac{1 + \sin \phi'_{cv}}{1 - \sin \phi'_{cv}}$$

Tots els assaigs dotats de la suficient expansió de la cavitat han d'assolir l'estat de volum constant. El canvi de coeficient  $K$  expressat en termes de dilatància queda com:

$$\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \left( \frac{1 + \sin \Psi}{1 - \sin \Psi} \right) \left( \frac{1 + \sin \phi'_{cv}}{1 - \sin \phi'_{cv}} \right)$$

Hughes et al [16] va considerar que el comportament esdevenia elastoplàstic perfecte per sobre d'una deformació de la cavitat del 10%. L'angle de dilatància associat a deformacions plàstiques roman constant. D'aquesta manera, la relació entre la deformació volumètrica i la deformació de tall queda:

$$\varepsilon_v = c - \gamma \sin \Psi$$

on  $c$  és un paràmetre introduït a partir de la Figura 22:

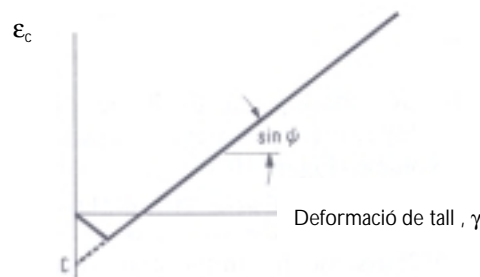


Figura 22.- Relació deformació de la cavitat-deformació de tall.

A l'inici de la fluència

$$p - u_0 = \sigma'_{ho} (1 + \sin \phi')$$

on  $u_0$  és la pressió intersticial *in situ* i  $\sigma'_{ho}$  la tensió efectiva horitzontal *in situ*. Un cop s'inicia la fluència, s'estableix la següent relació entre la pressió i la deformació a la cavitat :

$$\log_e (p - u_0) = s \log_e [\varepsilon_c + c/2] + A$$

on A és una constant. Si es representa gràficament la relació entre  $(p - u_0)$  i  $(\varepsilon_c + c/2)$  en escala doble logarítmica, s'obté una línia recta de pendent s, on:

$$s = \frac{(1 + \sin \Psi) \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}$$

Finalment, per tal de deduir els valors de  $\phi'$  i  $\Psi$ , s'utilitzen les següents expressions en funció de  $\phi'_{cv}$ :

$$\sin \phi' = \frac{s}{1 + (s - 1) \sin \phi'_{cv}}$$

$$\sin \Psi = s + (s - 1) \sin \phi'_{cv}$$

Ignorar els canvis de volum implica anul·lar el valor de  $\Psi$ .

## 6 .- INTERPRETACIÓ

---

### 6.1 .- Factors que alteren la interpretació dels assaigs pressiomètrics

Existeixen varies raons de discrepància entre les teories d'expansió d'una cavitat i la interpretació pràctica dels assaigs pressiomètrics. Aquestes raons són (Clarke, [6]):

1. Efectes de la instal·lació
2. Sonda no situada verticalment
3. La tensió vertical no és la tensió intermitja
4. Anisotropia del terreny
5. El terreny no es comporta com un medi continu (existència de discontinuïtats)
6. Drenatge parcial
7. Les propietats del terreny depenen del rang d'execució de l'assaig
8. La cavitat no s'expandeix com un cilindre

Es per això que a la pràctica s'utilitzen models simples per a la interpretació d'assaigs pressiomètrics.

### 6.2 .- Estimació de la tensió horitzontal

S'assumeix que el radi inicial de la cavitat és  $a_0$  i, per a aquest radi, la pressió a les parets de la cavitat és igual a la tensió horitzontal *in situ*,  $\sigma_h$ . L'anàlisi del pressiómetre com l'expansió d'una cavitat a partir de les condicions *in situ* requereix una identificació clara de la posició del radi pel valor de la tensió horitzontal *in situ*. Aquesta posició serà diferent en funció del tipus d'aparell pressiomètric que es faci servir (Figura 23). En assaigs SBP, si la perforació s'ha realitzat correctament, el radi inicial de la cavitat ha de coincidir amb el radi de la sonda i la pressió necessària per moure la membrana fora del cos de la sonda és la tensió horitzontal. No obstant, en ocasions aquest punt és difícil d'identificar.

Resulta més complicat identificar aquesta dada en assaigs PBP. En aquests assaigs, la pressió augmenta primer fins a superar la rigidesa de la pròpia membrana on, seguint l'expansió, s'augmenta la pressió per tal de comprimir la porció de terreny alterat durant la perforació. El punt allà on la corba esdevé lineal és la pressió  $p_0$  que equival al punt on la membrana entra en contacte amb les parets de la perforació que no equival a  $\sigma_h$ . Resulta molt complicat determinar la tensió horitzontal en assaigs PBP. Pel cas d'assaigs PIP, la tensió horitzontal no es pot identificar directament.

Existeixen diversos mètodes per a identificar la tensió horitzontal amb assaigs pressiomètrics:

1. mètode lift-off
2. mètodes basats en la resistència al tall
3. aproximant funcions (*curve fitting*)
4. correlacions semiempíriques

Molts d'aquests mètodes s'han desenvolupat específicament per als assaigs PBP i PIP, però també es poden usar per a comprovar els valor de  $\sigma_h$  en assaigs SBP si existeix algun dubte de la qualitat de la perforació.

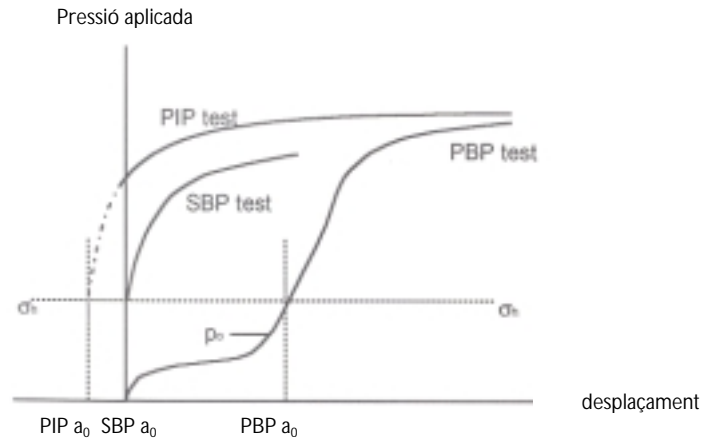


Figura 23.- Posició de referència per als diferents assaigs pressiomètrics [6].

## 1 .- Mètode *lift-off*

Aquest mètode és aplicable a pressiòmetres SBP tipus desplaçament radial i SBP amb mesura de volum on la membrana, a l'inici de l'assaig, estigui suportada pel cos de la sonda. S'augmenta la pressió fins a aconseguir que la membrana es desenganxi del cos de la sonda. Aquest valor de pressió correspon al de tensió horitzontal total. El mètode *lift-off* es basa en la premissa de que la sonda s'introdueix al terreny sense produir cap modificació de la magnitud de tensió horitzontal.

## 2 .- Mètodes basats en la resistència al tall

Existeixen dos mètodes basats en la resistència al tall d'argiles. Els mètode Marsland i Randolph [18] es basa en la resistència de pic i la tensió de fluència. El mètode Hawkins et al [19], denominat com a mètode Marsland i Randolph modificat, força les corbes d'assaig i la de tensió de tall-deformació a ser consistents durant la primera part de l'assaig.

El punt de fluència per a assaigs amb argiles rígides és  $p_L = \sigma_{h0} + S_u$ , d'on es pot extreure la tensió horitzontal total inicial,  $\sigma_{h0}$ .

## 3 .- Mètodes d'aproximació de funcions (*Curve fitting*)

La majoria d'interpretacions d'assaigs pressiomètrics implica la modelació de les dades de l'assaig. Si s'utilitza una única funció contínua per a descriure aquestes dades, es farà servir el mètode dels mínims quadrats. Si s'utilitzen multifuncions (per exemple, aquelles que separen el comportament elàstic del plàstic) és usual separar cada funció per la part rellevant de la corba o bé utilitzar procediments gràfics.

Aplicant una única funció continua a les dades pressiomètriques, l'ordenada que s'obté de la funció al valor de referència és la tensió horitzontal. Arnold [20] va proposar una relació hiperbòlica que pren la forma :

$$p = Q + \left( \frac{\varepsilon_c}{a + b\varepsilon_c} \right)$$

on  $Q$  és la intersecció de la corba amb l'eix vertical i  $a$  i  $b$  són constants.  $Q$  és la tensió horitzontal total en un assaig ideal. A la pràctica,  $Q$  no serà igual a  $\sigma_h$ , donat que existirà alguna distorsió durant la instal·lació. Per a tenir en compte aquest efecte, l'anterior expressió passa a ser:

$$p = Q + \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{01}}{a + b(\varepsilon_c - \varepsilon_{01})} \right)$$

on  $\varepsilon_{01}$  és la compensació de l'eix de deformacions per tal de permetre distorsió. Els paràmetres desconeguts  $Q$ ,  $a$ ,  $b$  i  $\varepsilon_{01}$  s'ajusten fins a obtenir una aproximació raonable.

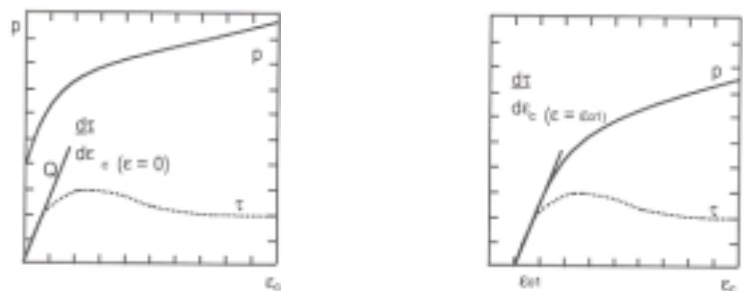


Figura 24.- Test ideal i amb alliberament de tensions.

Jefferies [21] va proposar que s'hauria d'utilitzar una corba completa de càrrega i descàrrega per a obtenir el valor de la tensió horitzontal total. Es trien valors de  $G$ ,  $S_u$  i  $\sigma_h$  i la formulació adient. El mòdul  $G$  controla la curvatura, la resistència controla el tamany de cicle complet i la tensió horitzontal controla el nivell de tensió. D'aquesta manera s'obtenen ràpidament aproximacions raonables de dades.

#### 4 .- Correlacions semiempíriques

Els valors de  $G$ ,  $S_u$  i  $\sigma_h$  es dedueixen de manera independent a partir de la corba d'assaig però són dependents l'un respecte l'altre.



Així doncs, per a un sòl elasto-plàstic perfecte, la tensió horitzontal ve donada per:

$$\sigma_h = p_l - S_u \left[ 1 + \ln \left( \frac{G}{S_u} \right) \right]$$

La pressió límit, resistència i mòdul de tall es deriven de forma separada a partir de la corba utilitzant els mètodes que es presentaran més endavant. Substituint els valors obtinguts s'obté el valor de  $\sigma_h$ . Fent un procediment iteratiu s'obté una millor aproximació de  $\sigma_h$ .

### 6.3.- Estimació del mòdul de tall (G)

Una de les majors utilitats de l'assaig pressiomètric és la determinació de la rigidesa del terreny. El mòdul de tall és una mesura de les característiques de deformació elàstica del sòl i es pot obtenir a partir de les següents expressions:

$$G = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{r}{r_0} \right) \cdot \frac{dp}{d\varepsilon_c} \longrightarrow G = \frac{1}{2} \cdot \frac{dp}{d\varepsilon_c}$$

$$G = V \cdot \frac{dp}{dV} \quad \text{on } V \text{ és el volum actual de la cavitat}$$

D'altra banda, si es representen els resultats en termes de pressió i deformació de la cavitat, la solució d'expansió de la cavitat cilíndrica suggereix que el mòdul de tall (G) és la meitat del pendent d'un graó (*loop* en la literatura geotècnica) de descàrrega-recàrrega (Figura 25).

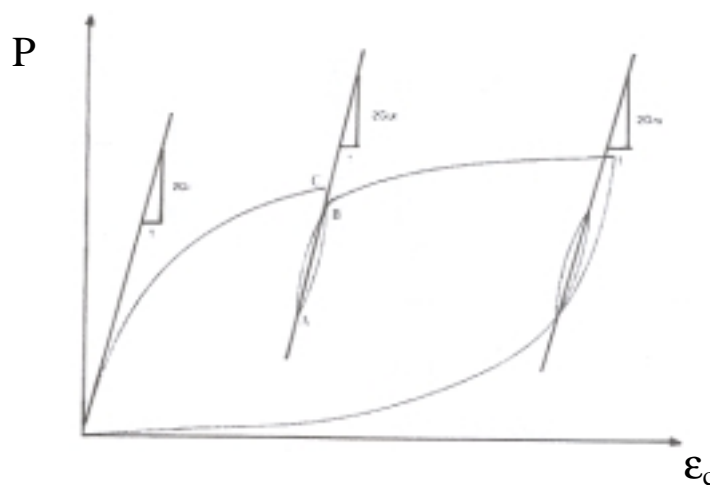


Figura 25.- Típica corba pressiomètrica amb graons de descàrrega- recàrrega.

El pendent inicial d'aquesta corba donarà un mòdul inicial,  $G_i$ , degut a l'alteració que causa la instal·lació del pressiómetre. Ara bé aquest valor s'ha de tractar amb delicadesa perquè no reflecteix les propietats reals del terreny. La utilització d'aquest mòdul inicial sovint porta a un disseny conservador. Resulta doncs necessari expandir la membrana lo suficientment lluny com per garantir que l'assaig s'està realitzant sobre terreny no distorsionat.

Si s'assumeix que el sòl té un comportament elastoplàstic perfecte, el mòdul de tall obtingut a partir de la trajectòria de descàrrega-recàrrega no depèn de la localització del *loop*. En realitat, però, la majoria de materials no es comporten exactament de manera elastoplàstica lineal i per tant, el mòdul pressiomètric és funció de la pressió i dels nivells de deformació en un procés de descàrrega-recàrrega.

Mentre es du a terme el procés de descàrrega-recàrrega és important assegurar que es dona en la regió elàstica per evitar un trencament del terreny per extensió. La recàrrega s'ha de fer de la mateixa forma, elàsticament, fins que es produeixi la fluència al punt on s'ha iniciat la descàrrega.

A partir de la teoria d'expansió d'una cavitat, si es considera un sòl elastoplàstic perfecte, la reducció màxima de pressió per a garantir una descàrrega elàstica en argiles és (Wroth, [22]):

$$(\Delta p)_{\max} = 2S_u$$

on  $S_u$  és la resistència al tall no drenat del sòl (Figura 26)

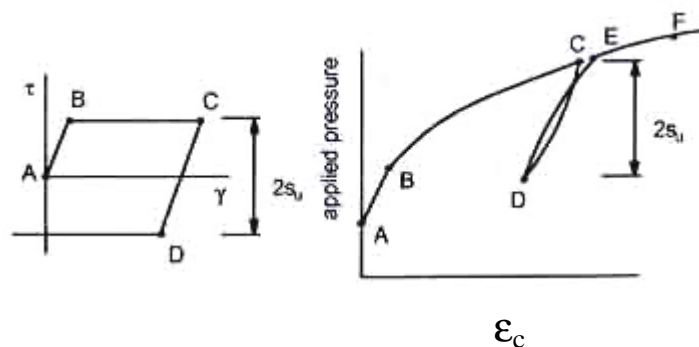


Figura 26.- Límit del comportament elàstic d'argiles sotmeses a descàrrega [6]

Si per contra el material considerat són sorres (treballant amb tensions efectives, partint de que l'assaig s'ha realitzat molt lentament → en condicions drenades) :

$$(\Delta p')_{\max} = p'_{un} \cdot \frac{2 \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}$$

on  $p'_{un}$  ( $p'_{un} = p - u_0$ ) és la pressió efectiva a la cavitat just a l'inici de la descàrrega pressiomètrica i  $\phi'$  és l'angle de fregament intern drenat (Figura 27)

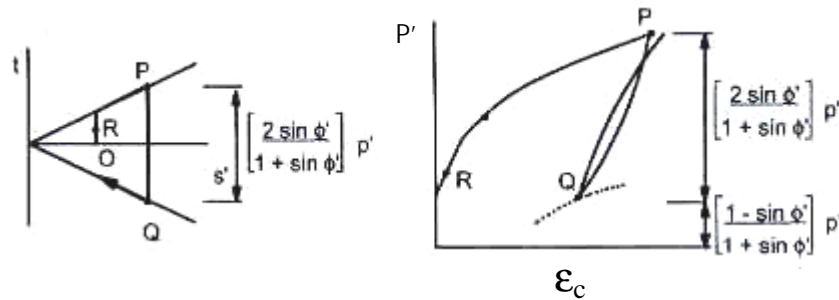


Figura 27.- Limit del comportament elàstic de sorres sotmeses a descàrrega [6].

### Correcció del mòdul de tall

Per tal de tenir en compte l'efecte de l'aparell en la mesura del mòdul de tall, és convenient realitzar un petit assaig, que consisteix en botir el pressiómetre dins un tub d'acer fins que la membrana entri en contacte amb les parets. Un cop s'ha assolit aquest contacte s'apliquen increments de pressió com en un assaig normal.

Si es representen els resultats en una gràfica  $p-\epsilon_c$  (Figura 28), es poden mesurar les deformacions aparents a mesura que s'augmenta la pressió, considerant que les possibles deformacions de la canonada d'acer són insignificants. D'aquesta manera es pot expressar la rigidesa del sistema com un "mòdul de tall" equivalent del sistema ( $G_{\text{sistema}}$ ), que es defineix com la meitat del pendent de la corba  $p-\epsilon_c$  i que té el següent efecte sobre el mòdul mesurat al terreny (Fahey i Jewell, [23]):

$$\frac{1}{G_{\text{corregida}}} = \frac{1}{G_{\text{mesurada}}} - \frac{1}{G_{\text{sistema}}}$$

Les dades de la Figura 28 mostren com la rigidesa del sistema varia al llarg de l'assaig. En aquest exemple, durant la càrrega inicial, amb pressions inferiors als 0,4 MPa,  $G_{\text{sistema}}$  és de l'ordre de 140 MPa, valor que a mesura que es rigiditza la corba, augmenta fins a uns 900 MPa (per valors de pressió superiors als 0,7 MPa). Ara bé, aquest comportament varia quan es fan graons de descàrrega-recàrrega, obtenint rigideses que van des de 400 fins als 1100 MPa (Figura 29), indicant com creix la rigidesa del sistema a mesura que s'augmenta la pressió.

P (MPa)

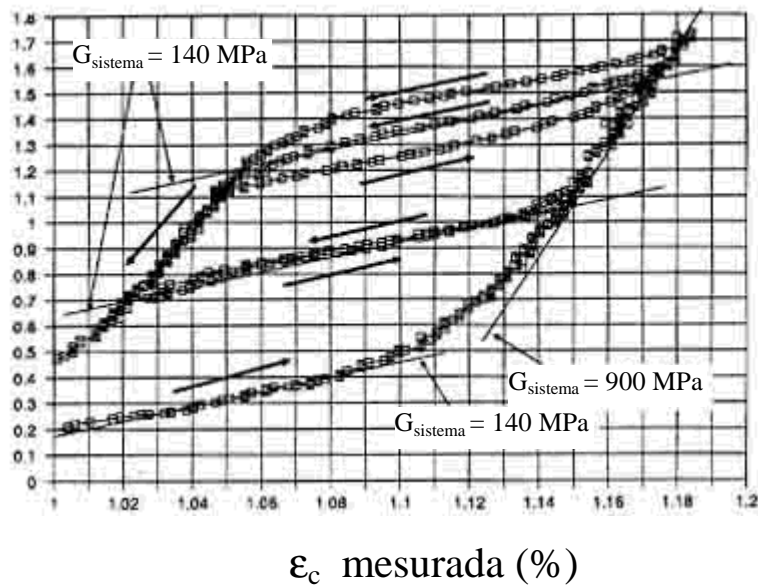


Figura 28.-Assaig de rigidesa del sistema en canonades d'acer[23].

P (MPa)

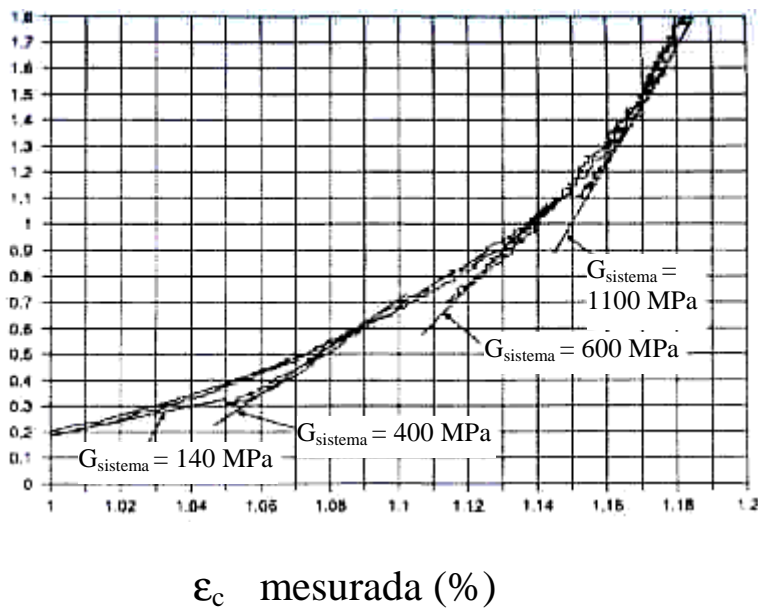


Figura 29.- Graons de descàrrega-recàrrega dins la canonada [23].

S'aconsella realitzar aquest assaig per a diferents diàmetres de canonades per tal de determinar si depèn també del percentatge de deformació i/o del nivell de pressions.

Es pot comprovar que la rigidesa del sistema es deu únicament a la compressibilitat de la membrana i a la funda protectora (llanterna xinesa), i que el valor de  $G_{\text{sistema}}$  obtingut és lo suficientment gran com perquè sigui considerat per la majoria de terrenys, però bàsicament en terrenys rígids.

## 6.4 .- Estimació de la resistència al tall no drenada ( $C_u$ )

La majoria de mètodes d'interpretació es divideixen en dues categories. La primera es basa en establir una relació completa tensió-deformació del sòl. Les corbes pressiòmètriques teòriques s'obtenen utilitzant eines de cavitats cilíndriques, ja sigui analíticament o numèricament. Comparant les corbes pressiòmètriques reals amb les teòriques es pot estimar la resistència al tall no drenada. Exemples d'aquesta aproximació són els mètodes de Gibson i Anderson [24], Jefferies [21] i Yu i Collins [25].

La segona categoria només suposa un comportament plàstic de l'argila. S'assumeix que l'assaig pressiomètric s'ha dut a terme sota condicions no drenades raó per la qual el sòl és incompressible. Els mètodes d'interpretació suggerits són els de Palmer [26], Baguelin et al [27] i Ladanyi [28].

Amb tot això cal tenir present que l'assaig pressiomètric sobreestima el valor de  $C_u$ .

### 6.4.1 .- Estimació a partir de l'anàlisi de càrrega en tensions totals

Gibson i Anderson [24] varen ser els primers a utilitzar la teoria d'expansió d'una cavitat en el desenvolupament de mètodes de interpretació, per a obtenir les propietats del terreny a partir d'assaigs pressiomètrics. Assumien que el terreny es comportava com un material elastoplàstic perfecte de Tresca. L'assaig pressiomètric s'idealitzava com l'expansió d'una cavitat cilíndrica de longitud infinita, en sòls sota condicions no drenades. A partir de la corba pressiomètrica teòrica, definida per

$$p = \sigma_{h0} + C_u \left[ 1 + \ln \left( \frac{G}{C_u} \right) \right] + C_u \ln \left( \frac{\Delta V}{V} \right)$$

si s'enfronten  $p - \ln \left( \frac{\Delta V}{V} \right)$ , el pendent de la regió plàstica (que hauria de ser una recta) equival a la resistència al tall no drenada ( $C_u$ ) del sòl (Figura 30).

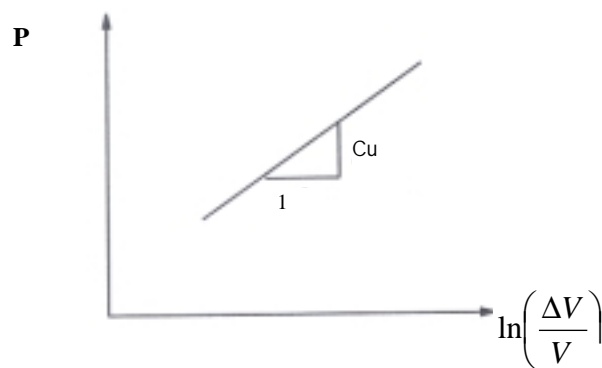


Figura 30.- Mètode gràfic utilitzant l'anàlisi de Gibson i Anderson [24].

#### 6.4.2 .- Estimació a partir de l'anàlisi de descàrrega en tensions totals

Per a analitzar els resultats pressiomètrics en descàrrega, Jefferies [21] i Houlsby i Withers [29] de forma independent varen estendre el mètode de Gibson i Henderson per a incloure les solucions de descàrrega de la cavitat. Jefferies [21] va derivar la solució en descàrrega per a aplicacions en assaigs pressiomètrics autoperforants i per tant, es varen utilitzar petites deformacions per a simplificar la matemàtica del problema. D'altra banda, Houlsby i Withers [29] varen utilitzar la solució de contracció d'una cavitat en el desenvolupament i interpretació del con pressiomètric, on era necessari considerar grans deformacions.

Jefferies [21] assumeix que el pressiòmetre expandit dins una argila en fase plàstica, es descarrega suaument. El pendent de la fase plàstica, que és lineal, serà el doble de la resistència al tall no drenada, Cu (Figura 31). La corba s'ha d'expressar en termes de

$p - \left( - \ln \left[ \frac{a_{\max}}{a} - \frac{a}{a_{\max}} \right] \right)$  on  $a_{\max}$  és el radi de la cavitat al final del graó de càrrega i  $a$  és el

radi de la cavitat en fase de descàrrega del pressiòmetre.

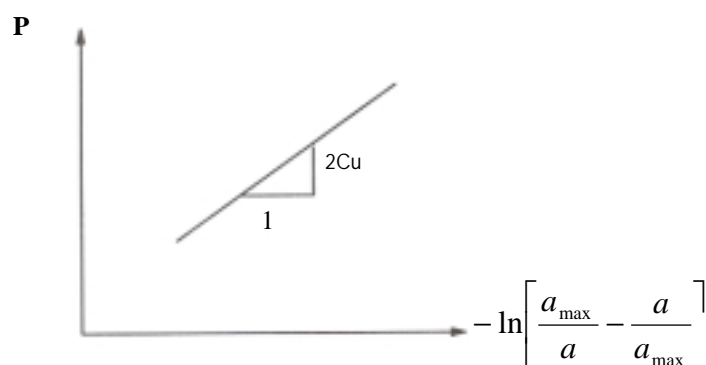


Figura 31.- Mètode gràfic utilitzant l'anàlisi en descàrrega de Jefferies [21].

Aquests dos apartats tracten l'expansió d'una cavitat en termes de tensions totals. Això és raonable per a argiles normalment o lleugerament consolidades, on la resistència del sòl no canvia significativament durant l'assaig pressiomètric no drenat. Però en sòls molt sobreconsolidats, la resistència al tall varia considerablement amb la història de deformacions i no s'hauria d'utilitzar l'anàlisi en tensions totals amb un model plàstic perfecte del terreny.

Yu i Collins [25] varen presentar l'anàlisi en tensions efectives per a l'assaig pressiomètric autoperforant no drenat. Es va utilitzar un model crític del sòl en l'anàlisi, de manera que la dependència de la resistència del sòl amb tensions efectives quedés adequadament tingut en compte. Seguint el procediment de Gibson i Anderson [24] de derivació de la resistència al tall no drenada a partir de l'assaig pressiomètric autoperforant, es va establir una correlació teòrica entre l'OCR i la resistència al tall no drenada. D'aquesta manera, amb el valor de la resistència al tall no drenada obtinguda d'un assaig triaxial no drenat ( $C_u$ ) i el valor deduït de corbes pressiomètriques ( $C_m$ ), es defineix el coeficient pressiomètric ( $C_m/C_u$ ) que es relaciona amb l'OCR tal i com apareix a la Figura 32.

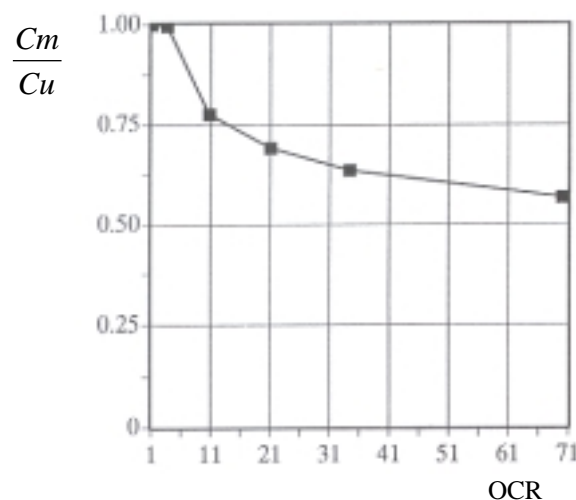


Figura 32.- Relació entre l'OCR i el coeficient de resistència pressiomètrica [24].

#### 6.4.3 .- Estimació a partir de la pressió límit

Quan una cavitat cilíndrica s'expandeix en un sòl elastoplàstic perfecte, la pressió límit es defineix com:

$$P_L = \sigma_{h0} + C_u \left[ 1 + \log \left( \frac{G}{C_u} \right) \right]$$

i s'assoleix quan la cavitat pressiomètrica s'expandeix indefinidament; això succeeix quan  $\Delta V/V=1$ .

Amb el valor de  $P_L$ , la resistència al tall no drenada es pot expressar segons,

$$Cu = \frac{(P_L - \sigma_{h0})}{\left[1 + \log\left(\frac{G}{Cu}\right)\right]} \quad \text{o} \quad Cu = \frac{(P_L - \sigma_{h0})}{N_p}$$

on  $N_p = 1 + \log_e\left(\frac{G}{Cu}\right)$  és l'anomenada constant pressiomètrica segons Marsland i Randolph [18]. A la Figura 33 apareix la relació entre  $N_p$  i el quocient  $(G/Cu)$ .

A la realitat, la pressió límit no s'assoleix mai i és per això que s'ha d'extrapolar a partir de valors menors de  $\Delta V/V$ .

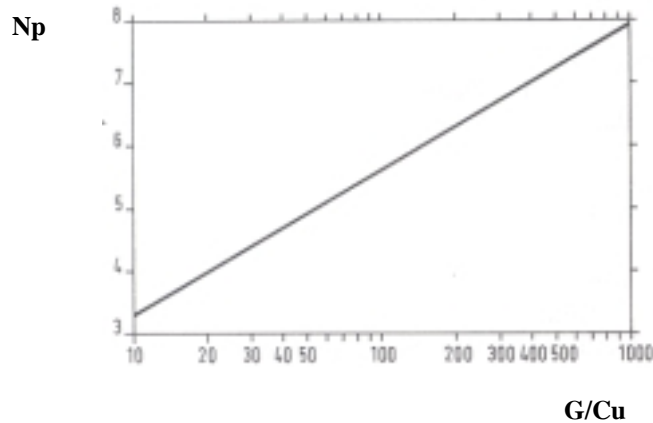


Figura 33.- Variació de la constant pressiomètrica  $N_p$  amb el quocient  $G/Cu$  [18].

L'extrapolació pot fer-se gràficament representant pressió versus  $\log_e(\Delta V/V)$ . Per a un material elasto-plàstic perfecte, les dades haurien de seguir una línia recta (Figura 34), raó per la qual no presenta cap problema l'extrapolació. Ara bé, per la majoria de sòls que no presenten un comportament ideal, no resulta tan fiable a menys que s'assoleixin grans deformacions.



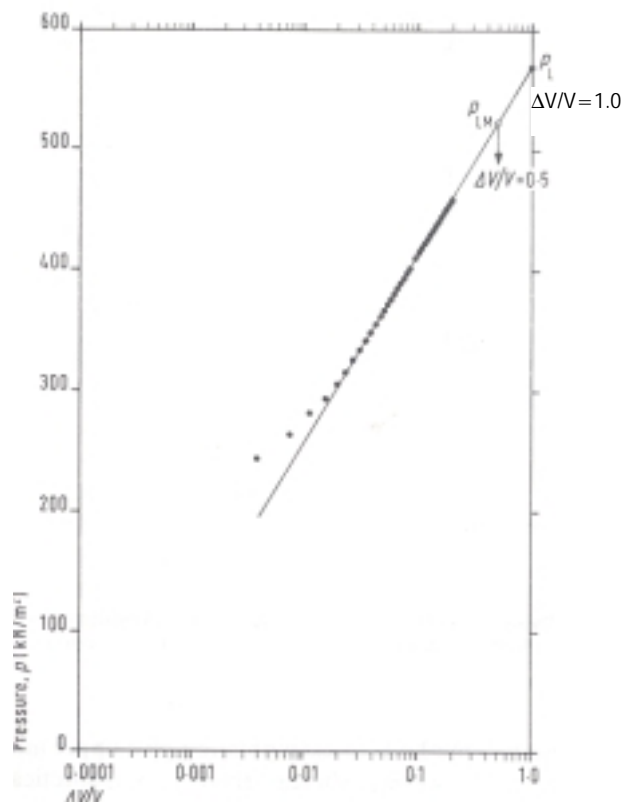


Figura 34.-Determinació gràfica de la pressió límit [4].

Per tal de reduir el possible error comès en l'extrapolació, la interpretació dels assaigs MPM usualment es realitza en termes de pressió on  $\Delta V/V_0 = 1$ , que correspon a  $\Delta V/V = 0,5$  i  $\epsilon_c = 0,41$ . Aquest valor de pressió denominat  $p_{LM}$ , pressió límit de Ménard, no s'ha de confondre amb la pressió límit vertadera,  $p_L$ , a qui li correspon  $\Delta V/V = 1$ .

## 6.5 .- Estimació dels angles de fricció interna ( $\phi$ ) i de dilatància ( $\psi$ )

A partir d'un assaig pressiomètric en sorres es pot deduir l'angle de fricció interna i de dilatància. S'obtenen a partir del pendent de la recta  $\log_e(p-u_0) : \log_e \epsilon_c$  (Figura 35), que respon a la fórmula :

$$s = \frac{(1 + \sin \Psi) \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}$$

Poden existir incerteses a l'hora de determinar la pressió intersticial ( $u_0$ ), és per això que cal tenir especial cura a l'hora d'escollir les dades de referència.

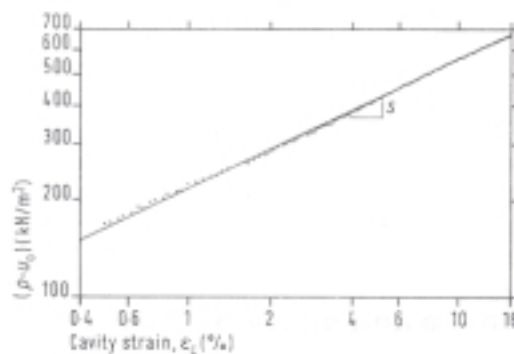


Figura 35.- Obtenció del paràmetre  $s$  [4].

Els valors de  $\phi'$  i  $\psi$  es poden obtenir aplicant les fórmules

$$\sin \phi' = \frac{s}{1 + (s-1)\sin \phi'_{cv}} \quad \text{i} \quad \sin \Psi = s + (s-1)\sin \phi'_{cv}$$

El valor de  $\phi'_{cv}$  es pren dels resultats obtinguts d'un assaig triaxial drenat o bé del tall directe. Aquests mètodes tendeixen a infravalorar els valors de  $\phi'_{cv}$ , cosa que es tradueix en valors deduïts de  $\phi'$  inferiors i de  $\psi$  superiors als reals. En absència d'aquesta dada es pot utilitzar els valors de la Taula 2:

Tipus de sòl	$\phi'_{cv}$
Graves ben graduades-sorres-llims	40
Sorra grollera uniforme	37
Sorra mitjana ben graduada	37
Sorra mitjana uniforme	34
Sorra fina ben graduada	34
Sorra fina uniforme	30

Taula 2.- Valors típics de  $\phi'_{cv}$  segons Robertson i Hughes [30].

## 6.6 .- Estimació del coeficient de consolidació horitzontal

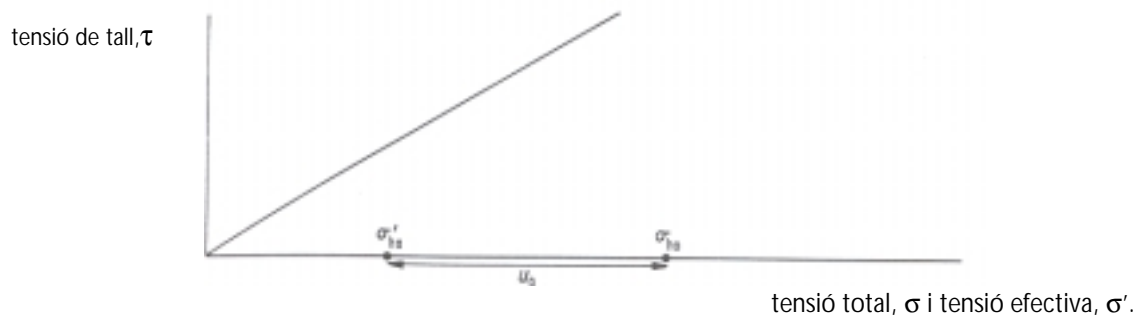
Els pressiòmetres s'utilitzen per a mesurar la dependència del temps de paràmetres a partir de l'observació dels canvis en la paret de la cavitat mantenint una pressió o un desplaçament constant. En la majoria de casos, els assentaments que es produeixen en les fonamentacions es donen més ràpid del temps predit a partir dels assaigs de consolidació en laboratori. Aquest assaig acostuma a ser l'edomètric, que permet un drenatge vertical. Ara bé, generalment, la permeabilitat horitzontal acostuma a ser major que la vertical, per qüestions de fabrica del terreny, de manera que la dissipació de pressions en aquesta direcció és més ràpida.

Per aquesta raó, el grau d'assentament d'una fonamentació hauria d'estar governat pel coeficient de consolidació horitzontal,  $C_h$ , més que pel coeficient de consolidació vertical,  $C_v$ . Un efecte important també és l'efecte d'escala. No és lo mateix assajar una mostra de diversos centímetres que el propi terreny *in situ*.

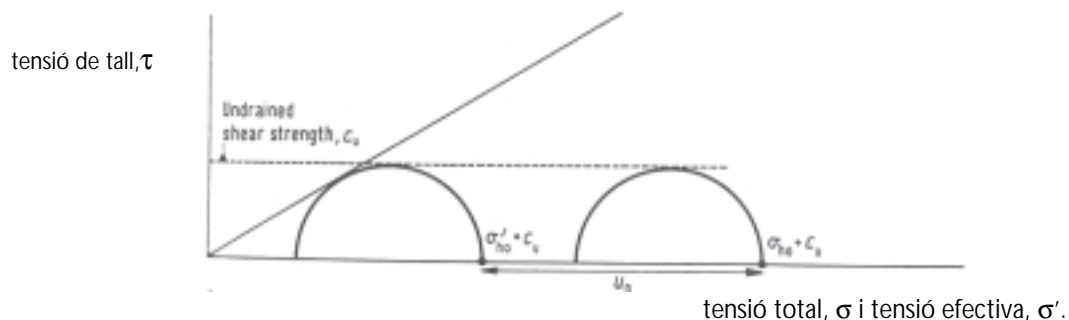
Quan es realitza un assaig en un terreny elasto-plàstic perfecte, la pressió de pors inicial *in situ* és  $u_0$ . Quan apareixen les deformacions plàstiques en la paret de la cavitat, la pressió intersticial continua essent  $u_0$ , però la pressió a la cavitat s'ha incrementat fins a  $\sigma_{ho} + C_u$ . Per a increments superiors de pressió a la cavitat, les tensions efectives no canvien i un increment de pressió a la cavitat es transforma en un increment de pressió intersticial de :

$$\Delta u = p - (\sigma_{ho} + C_u)$$

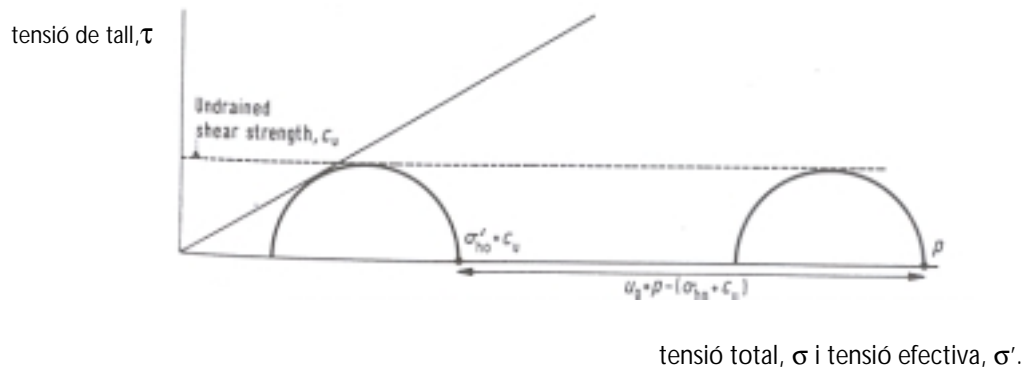
tal com apareix a la seqüència de la Figura 36.



a.- Estat inicial.



b.- Inici de la deformació plàstica..



c.- Increments de pressió superiors.

Figura 36.- Generació d'excés de pressió de pors durant l'expansió pressiomètrica en un sòl elastoplàstic perfecte [4].

Al voltant de la secció carregada es genera una corona plàstica limitada per una altra corona elàstica que es troba a la distància  $R = r \exp\left(\frac{\Delta u}{2C_u}\right)$ .

En la regió plàstica, la pressió de pors varia logarítmicament amb la distància a la sonda (Figura 37). Si s'aturés la deformació sobre la cavitat, la pressió de pors es dissiparia.

D'aquesta manera, el coeficient de consolidació horitzontal es pot calcular utilitzant el factor adimensional,  $T_{50}$  on  $T_{50} = \frac{C_h t_{50}}{r^2}$ .

Eix del pressiòmetre

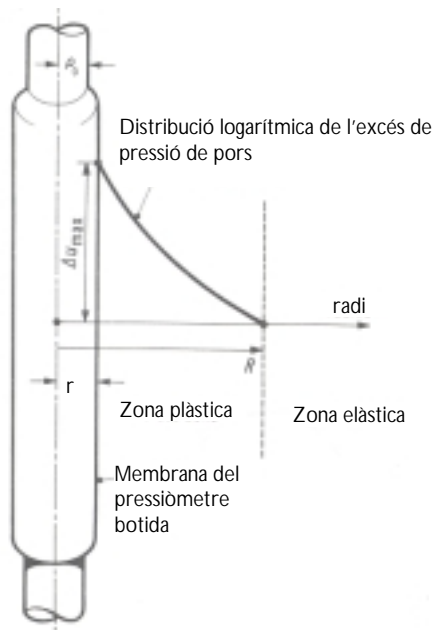


Figura 37.- Distribució radial de l'excés de pressió de pors.

## 7 .- DESCRIPCIÓ DE LA SONDA PRD

---

Dins la classificació de tipus de sondes introduïda en apartats anteriors, la sonda PRD es pot incloure dins el grup de les *prebored* (PBP) o amb perforació prèvia.

Es tracta d'una sonda ideada per a assaigs en roca i sòls, podent assolir valors de pressió de fins a 300 bar. La utilització de transductors de desplaçament rau en la obtenció de informació molt més precisa de l'expansió d'una cavitat que amb sistemes de mesura volumètrics. Aquesta precisió és particularment important en assaigs en roca on els desplaçaments són sovint molt petits.

La sonda té una longitud total de 1,45 m dels quals 525 mm són els corresponents a la secció d'assaig. El diàmetre exterior és de 72 mm. Això implica una relació L/D de 7,3. Les membranes utilitzades són de poliuretà i presenten diferents dureses en funció del material que es vulgui assajar.

Els components de la sonda es mostren a la figura Figura 38 i a continuació es mostra una fotografia (Fotografia 3) de l'equip PRD. Els desplaçaments es determinen gràcies a quatre braços articulats que estan en contacte amb un LVDT i amb la membrana, de manera que qualsevol moviment que pateixi la membrana és captat pels LVDT. La disposició dels quatre braços és a 90° un respecte de l'altre, de manera que també existeix la possibilitat de conèixer el diàmetre de la cavitat. Aquests braços es denominen R1, R1A, R2 i R2A al llarg del treball .

El transductor de pressió així com tots els components electrònics es situen a l'extrem superior de la sonda.

De la sonda surten dos cables. Un és el tub hidràulic per mitjà del qual es transmet la pressió a la secció d'assaig i l'altre és el corresponent al sistema electrònic que comunica la informació de la sonda a la unitat de control situada en superfície.

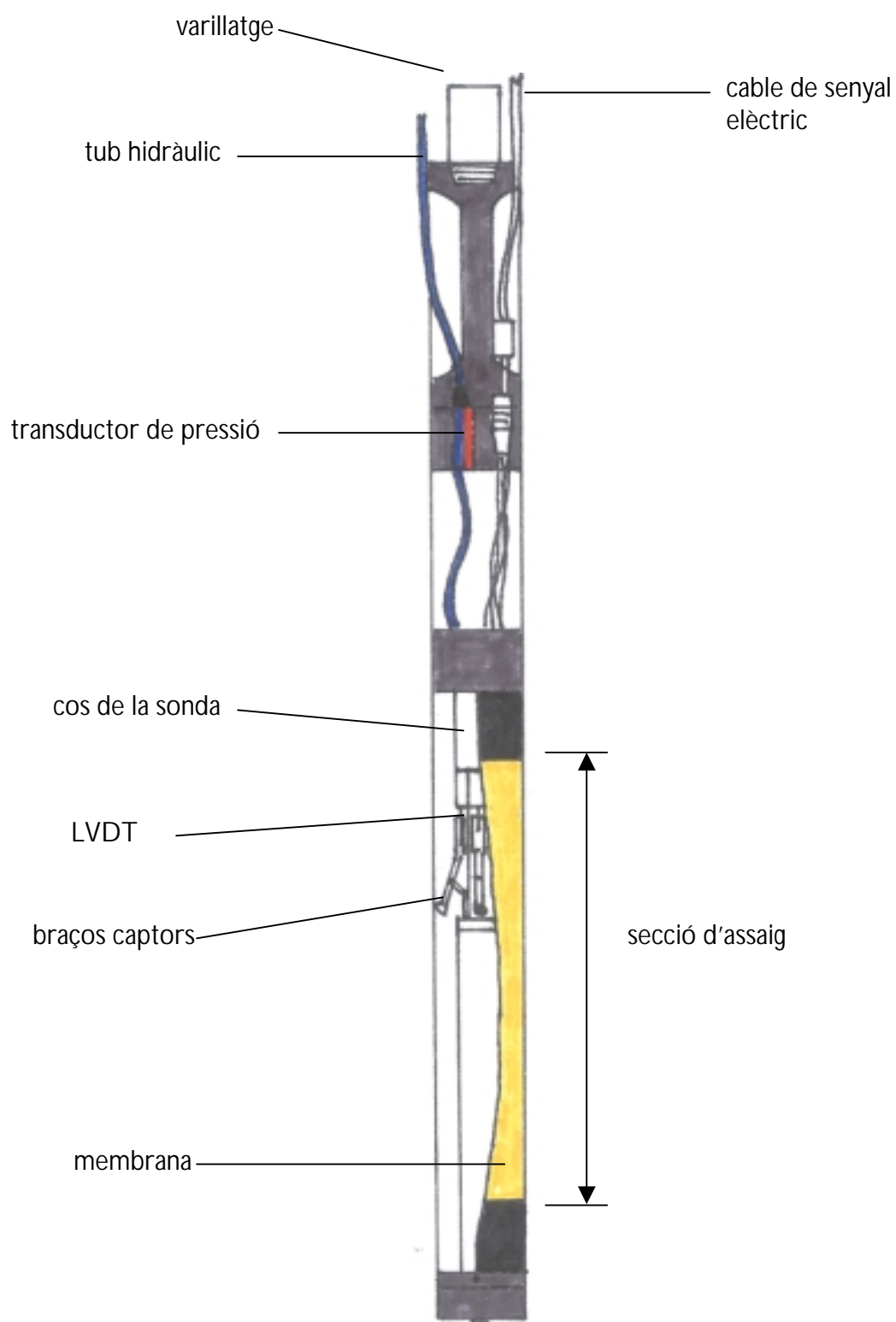


Figura 38.- Esquema del PRD.



Fotografia 3 .- Equip de pressiometria PRD

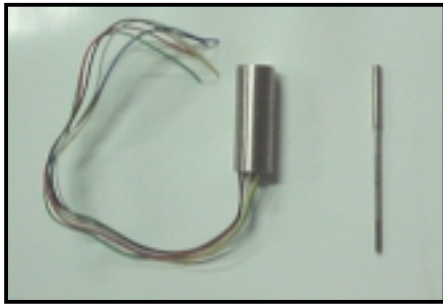


## 7.1 .- Caracterització dels sistemes de mesura

Aquest apartat recull la caracterització del sistema de mesura del desplaçament així com del sistema de mesura de la pressió. Ambdós casos estan formats per transductors però el seu tractament resulta bastant diferent.

### 7.1.1 .- Captors de desplaçament

El sistema de mesura del desplaçament està format per quatre LVDT (Fotografia 4), situats verticalment dins dels cos de la sonda i a 90° un respecte de l'altre, tal com apareix a la Fotografia 5. El recorregut dels LVDT consta de 10.000 punts, que amb unitats de mesura es tradueix en un total de 10 mm (és a dir, 1 punt equival a  $0,001\text{mm} \rightarrow 1\mu$ ). Per tal de mesurar el desplaçament de la membrana s'ha de situar algun element mecànic que posi en contacte els LVDT amb la membrana.



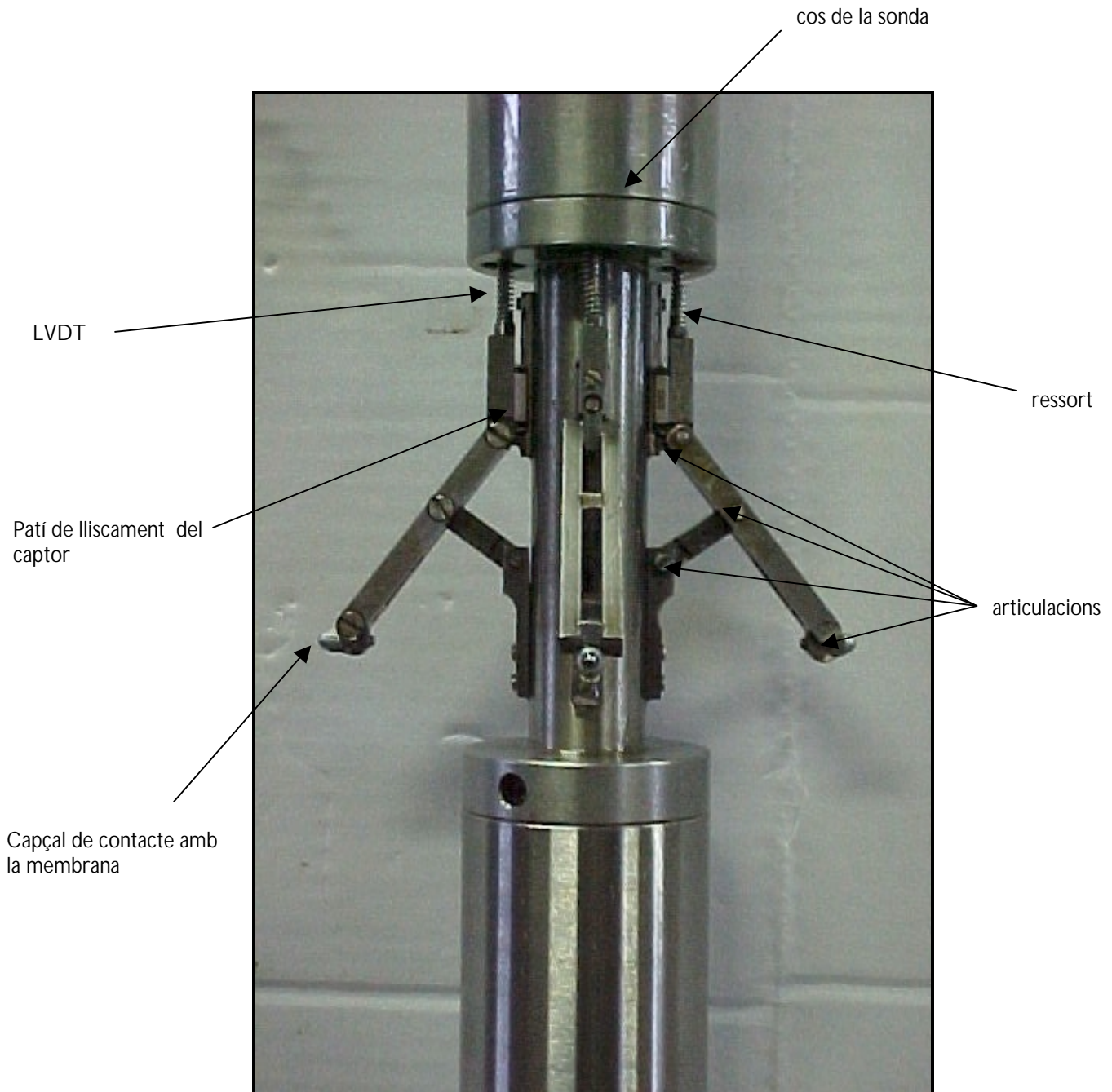
**Fotografia 4** .- Transductors tipus LVDT utilitzats a la sonda PRD.

Es tracta d'uns braços articulats d'acer que, forçats per una molla, es troben sempre en contacte amb la membrana, de manera que qualsevol moviment que pateixi la membrana queda captat pels LVDT.



**Fotografia 5** .- Disposició dels LVDT a l'interior de la sonda

Aquesta distribució (Fotografia 6) genera un moviment de ventall lo que es tradueix en una comportament no lineal del sistema, és a dir, cada mil·límetre que es desplaça l'LVDT no correspon a un mil·límetre de desplaçament de la membrana. Aquesta relació és incremental i per tal d'assegurar la precisió de les lectures, s'ha d'establir la relació correcta entre ambdós desplaçaments.



Fotografia 6 .- Distribució dels captors de desplaçament.

Per a aconseguir-ho, es va fer una simulació del moviment. Utilitzant el programa AUTOCAD es va reproduir el moviment de tot el sistema de lectura de mig en mig mil·límetre, obtenint el resultat que es mostra a la Figura 39.

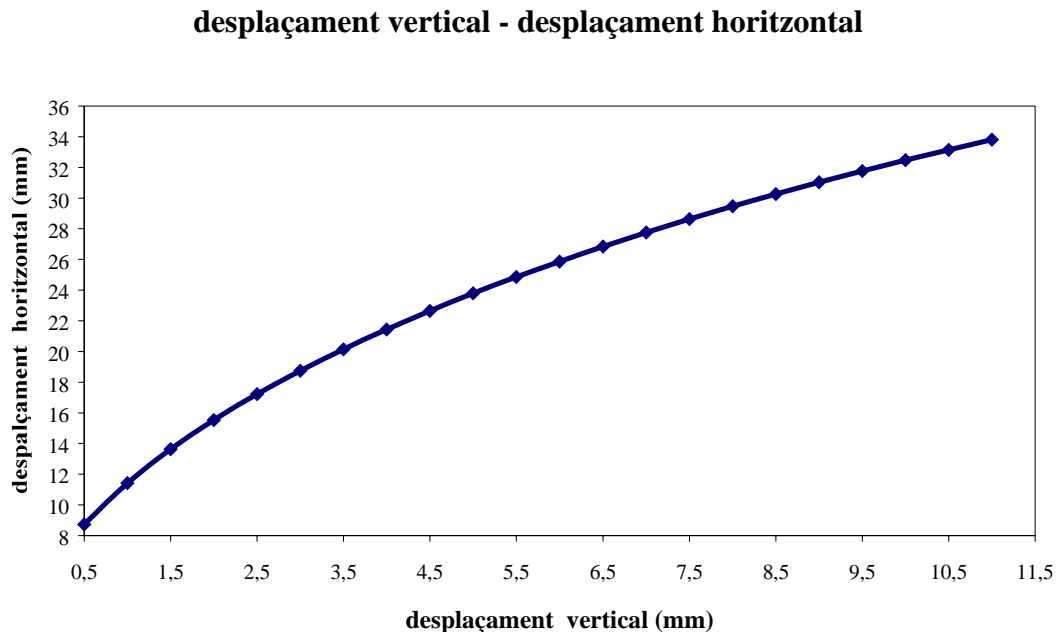


Figura 39.- Relació moviment horitzontal vs moviment vertical.

Aquesta transformació del desplaçament vertical de l'LVDT a l'horitzontal del braç es tradueix en una reducció de la precisió de 0,001 a 0,003 mm ( $3\mu$ ).

Un cop detectat aquest comportament no lineal, cal establir una correlació real entre el moviment dels braços captors i el moviment del respectiu LVDT. La idea resulta ben senzilla, només cal prendre lectures dels LVDT per a un desplaçament conegut.

La manera de dur a terme aquesta tasca és enfrontant cada braç a una superfície plana de la qual es coneix la distància respecte l'eix de la sonda i de la que es controla el moviment relatiu que es pot generar gràcies a l'ajuda d'un comparador. Amb els medis de que es disposava, es va optar per col·locar la sonda en un torn. Un cop centrada, es disposa una placa enfrontada a un braç de lectura, el moviment de la qual es genera amb un cargol i es controla amb un comparador (Fotografia 7).



Fotografia 7 .- Disposició de la sonda al torn durant la calibració del braços captors de desplaçament.

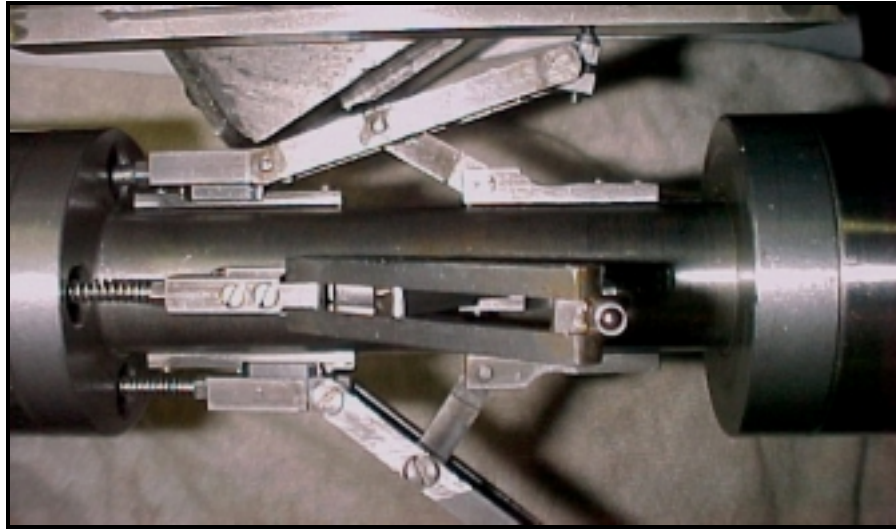


Es prenen lectures cada 0,2 mm en els dos sentits del moviment dels braços. Aquesta acció es realitza pera a cada un dels quatre braços rotant la sonda i situant els braços perpendicularment a la placa de moviment. A partir d'aquí es treu la correlació existent entre el moviment vertical dels LVDT i l'horitzontal dels captors.

Fotografia 8 .- Detall de la placa mòbil perpendicular al capçal del braç captor.

Fotografia 9 .- Detall





Fotografia 9 .- Detall del contacte entre un braç captor i la superfície mòbil.

Els resultats obtinguts es presenten a la Figura 40.

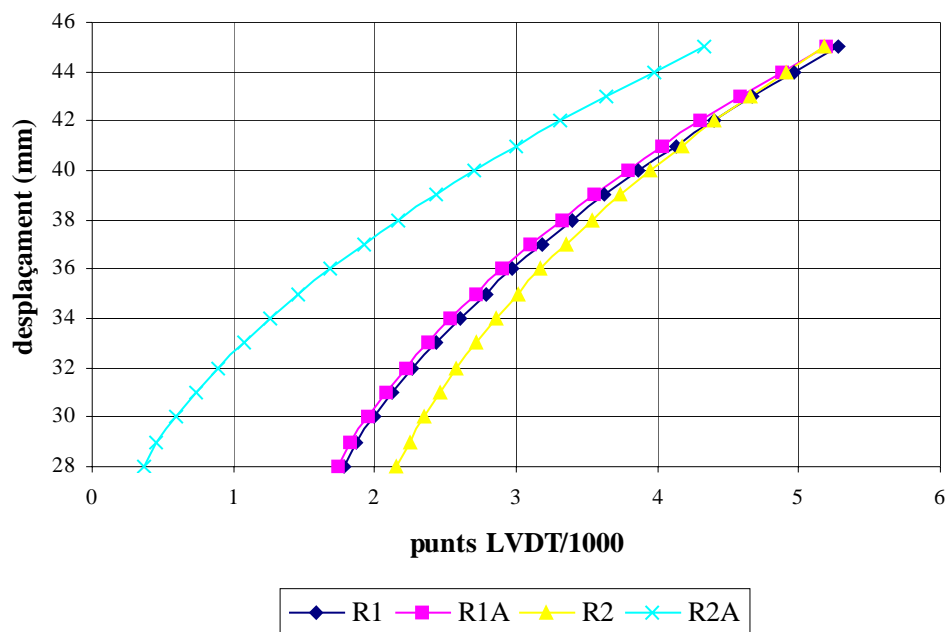


Figura 40 .- Corba de correlació entre les lectures dels LVDT i el desplaçament real.

### Comentaris als resultats obtinguts

Es pot detectar que els braços R2 i R2A, tot i presentar el mateix comportament, parteixen d'òrgens diferents. L'explicació d'aquest fet és ben senzilla. Per començar, LVDT del radi 2A és un model diferent a la resta. D'altra banda, la determinació dels zeros de cada LVDT motiva que no comencin tots allà mateix.

La precisió del sistema (captors-LVDT) és de 0,01mm., mentre que la dels LVDT sense element mecànic (braços captors) és de 0,001 mm i amb elements mecànics és de 0,003 mm (teòricament). Per tant la causa d'aquesta reducció de precisió és única i exclusivament deguda als braços captors del desplaçament. Segurament es podria reduir aquest error si es retoquessin aquests braços, modificacions que s'estan duent a terme en la segona versió d'aquest prototipus .

Donada la sensibilitat dels LVDT resulta poc fiable introduir una funció no lineal i s'ha optat per treballar amb pendents. Així doncs, al marge del valor que doni l'LVDT, el programa li aplicarà un coeficient de creixement que anirà disminuint a mesura que els braços de lectura estiguin més oberts perquè la corba de correlació va disminuint el seu pendent a mesura que creix el desplaçament. O sigui, li està dient quin pendent de creixement han de seguir les lectures. Aquesta transformació ens permet obtenir de manera directa i per pantalla el valor de desplaçament de cada radi al llarg d'un assaig.

Amb totes aquestes dades, ja s'està en condicions d'introduir al programa de gestió de la sonda la funció de determinació del desplaçament. Es tracta del programa PL7PRO que utilitza un codi de captura i de tractament de les dades que li faciliten els diferents transductors. Sobre aquestes lectures s'apliquen diferents transformacions que ens faciliten el valor de desplaçament (i més endavant el de pressió).

Es recomana calibrar el sistema de mesura abans de cada assaig . Amb la sonda nua, sense membrana, es col·loca dins un tub de diàmetre conegut i es comprova si el sistema està correctament calibrat (Fotografia 10). Si no fos així s'hauria de tenir en compte el valor de variació a l'hora de realitzar el post-procés.



Fotografia 10 .- Calibrador dels captors de desplaçament.

### 7.1.2 .- Transductors de pressió

La determinació de la pressió mitjançant transductors resulta molt senzilla. Els transductors tenen un recorregut efectiu de 2.000 a 10.000 punts, lo que es tradueix en una simple divisió dins el programa de gestió de l'assaig. D'aquesta manera, per a un transductor de 250 bar, cada 32 punts correspon a 1 bar.

Per tal de ratificar-ho s'ha enfrontat el transductor a un manòmetre de pressió del mateix rang de mesura, obtenint un resultat completament satisfactori.

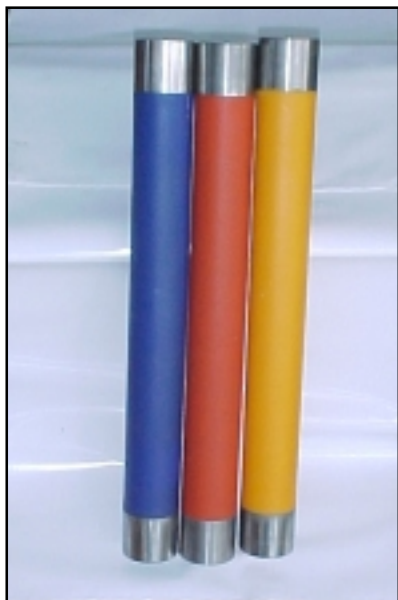
Igual que pel cas del desplaçament apareixen els valors per pantalla de manera instantània al llarg de tot l'assaig.

## 7.2 .- Caracterització de les membranes de poliuretà

Com a material genèric, les membranes que s'utilitzen en pressiometria acostumen a ser de cautxú, el comportament del qual està àmpliament estudiat<sup>6</sup>. Per a l'equip PRD es va decidir experimentar amb membranes de poliuretà. La utilització d'aquestes membranes dins l'àmbit estatal resulta tot una novetat que s'uneix a la ja prou important tasca de desenvolupar un nou pressiòmetre.

A continuació es presenten aquestes membranes de poliuretà i com es comporten sota pressió, així com les respectives calibracions.

### 7.2.1 .- Presentació de les membranes de poliuretà



El poliuretà és un material molt elàstic i a la vegada molt resistent. Aquests dos factors són clau a l'hora de triar el material de les membranes a utilitzar en un assaig pressiomètric.

Les membranes que s'utilitzen en el prototip PRD tenen unes dimensions de 645 mm de llarg per 72 i 58 mm de diàmetre (exterior i interior respectivament), lo que significa un gruix de 7 mm.

El poliuretà segons la seva constitució química presenta diferents dureses de les que s'han triat 70, 80 i 90, codificades en funció del seu color ( blau, vermell i groc respectivament).

Fotografia 11.- Exemple de les diferents membranes

### 7.2.2 .- Calibració de les membranes

La calibració de les membranes ens donarà el seu comportament sota càrrega, és a dir, en condicions d'assaig. Aquestes calibracions es poden dividir en :

- Rigidesa de la membrana
- Compressibilitat de la membrana

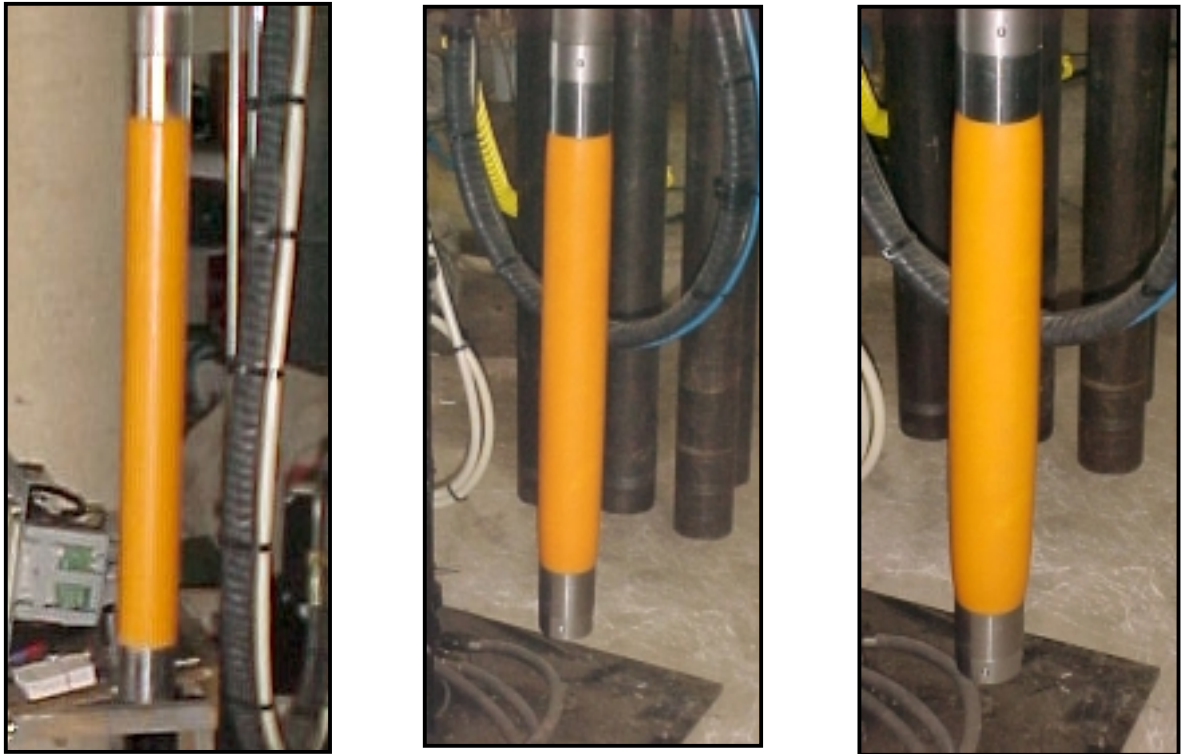
La rigidesa de la membrana es pot definir com la pressió necessària per a moure la membrana a partir d'una posició en repòs. D'altra banda, la compressibilitat de la membrana és l'aplastament que pateix quan entra en contacte amb el terreny, en el cas d'assaig, o amb la canonada de calibració si s'està calibrant.

---

<sup>6</sup> Altres materials com el nitril reforçat amb kevlar pels extrems s'han experimentat a la Gran Bretanya.

### Rigidesa de la membrana

Per tal de realitzar la calibració d'inèrcia, es botiran les membranes a l'aire lliure seguint el mateix protocol d'assaig, aplicant un graó de càrrega cada minut, amb la diferència que les lectures es prendran cada minut. La pressió a aplicar per graó dependrà del tipus de membrana a calibrar. Donat que es disposen de tres dureses diferents, el valor de pressió màxim a assolir també serà diferent. El rang màxim de desplaçament ha de ser el que s'espera assolir en un assaig normal. A la seqüència de la fotografia 12 es pot observar l'evolució d'una membrana al llarg d'una inèrcia a l'aire lliure.



Fotografia 12 .- Progressió de la membrana al llarg d'una inèrcia des de la situació de repòs.

Es van realitzar nombrosos assaigs amb les diferents membranes per tal de determinar el seu comportament i els seus límits. És important conèixer si l'expansió de la membrana és homogènia dins el rang de treball.

Amb tot això, la Figura 41 presenta, a títol d'exemple, una de les moltes proves que es van realitzar. Es tracta d'una membrana de rigidesa 90.



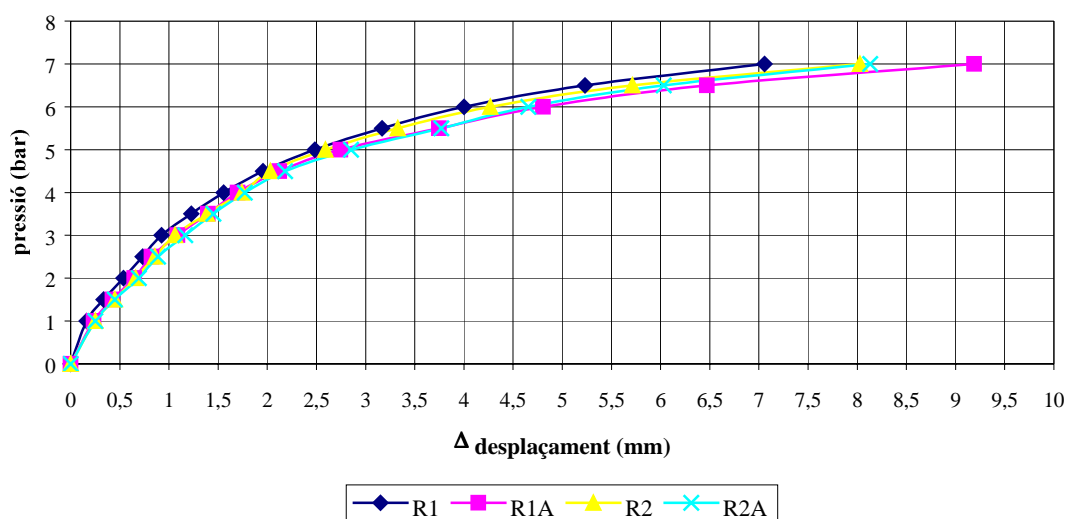


Figura 41 .- Corba d'inèrcia a l'aire lliure.

Els graons de càrrega s'han fet de mig en mig bar fins a un valor màxim de 7 bar. L'expansió de la membrana no és del tot homogènia, per què tal i com es comprova gràficament, per a la màxima pressió, els desplaçaments van des dels 7 fins als 9 mm. Aquest fet també es detecta amb les membranes de cautxú que utilitza l'OYO. La diferència és que aquest disposa de membranes de 14 mm de gruix, que retarden el comportament no homogeni, i d'una única dada de desplaçament (diàmetre), la qual cosa dificulta detectar expansions no homogènies.

A partir d'aquesta corba, s'ajusta un funció numèrica a cada radi. S'obté la pressió d'inèrcia per a tot el rang de desplaçament de la membrana que ens servirà per a aplicar la correcció per membrana pertinent.

Un punt important és que les membranes noves s'han d'exercitar varies vegades abans de la seva calibració per què quan son noves presenten una major rigidesa. A la Figura 42 es presenten tres corbes d'inèrcia, pertanyents a un braç captor, realitzades sobre la mateixa membrana. Es pot observar com per a una mateixa pressió, el desplaçament és major a mesura que s'exerceix la membrana. La corba blava correspon a la membrana totalment nova. Les altres dues corbes corresponen a inèrcies amb la membrana ja exercitada. Aquestes dues corbes ja són molt més semblants, fins arribar a un moment en que aquesta corba d'expansió s'estabilitza per a cada nou assaig.

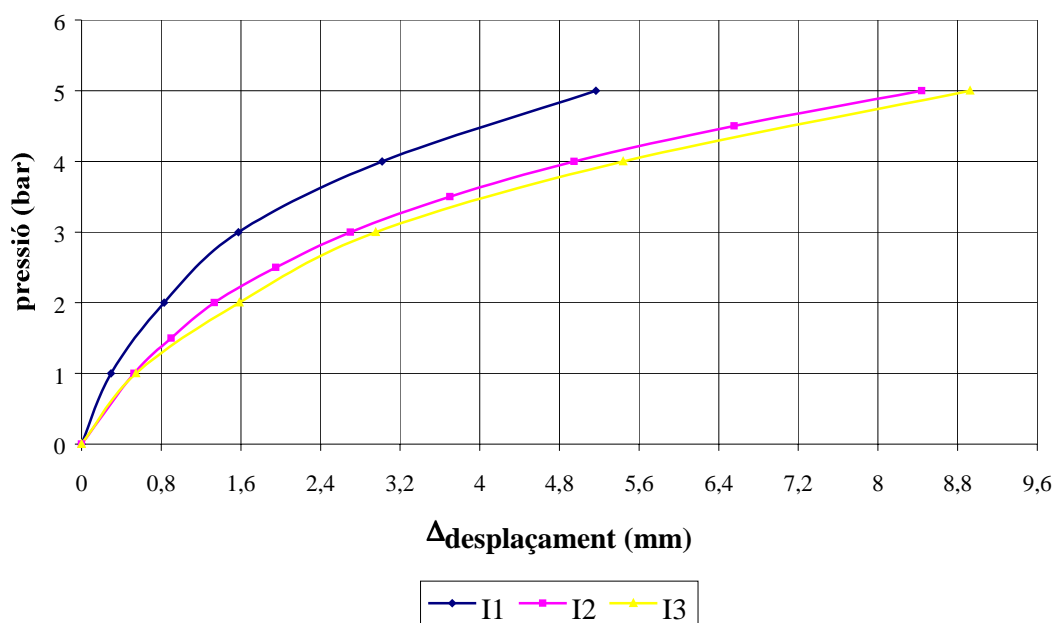
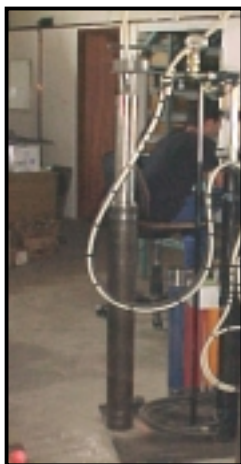


Figura 42 .- Evolució de la rigidesa de la membrana.

Es comprova que és necessari exercitar la membrana varies vegades quan és nova, abans de la seva utilització al camp.

### Compressibilitat de la membrana

La compressibilitat de la membrana es pot definir com el canvi de gruix de la membrana quan aquesta comença a treballar en un assaig. Es diu que una membrana comença a treballar quan entra en contacte amb les parets de la perforació. El poliuretà, en ser un material altament elàstic, es comprimeix a mesura que suporta increments de càrrega, de manera que la pressió exercida sobre la parets dels sondeig es reparteix entre la compressió de la membrana i la deformació del terreny.



Per a corregir aquest efecte, es realitzen calibracions en canonades d'acer indeformable (Fotografia 13).

$$\text{deformació total} = \text{deformació membrana} + \text{deformació terreny}$$

S'introdueix la sonda a l'interior d'una canonada d'acer de diàmetre conegut (acostuma a ser de 76 mm, que és el diàmetre de les perforacions per a pressiómetres) i es procedeix com si d'un assaig es tractés. Es prenen lectures de la pressió i del desplaçament cada minut i es representen gràficament. El resultat serà una corba com la de la Figura 43.

Fotografia 13 .- Posició de la sonda dins la canonada de calibració.

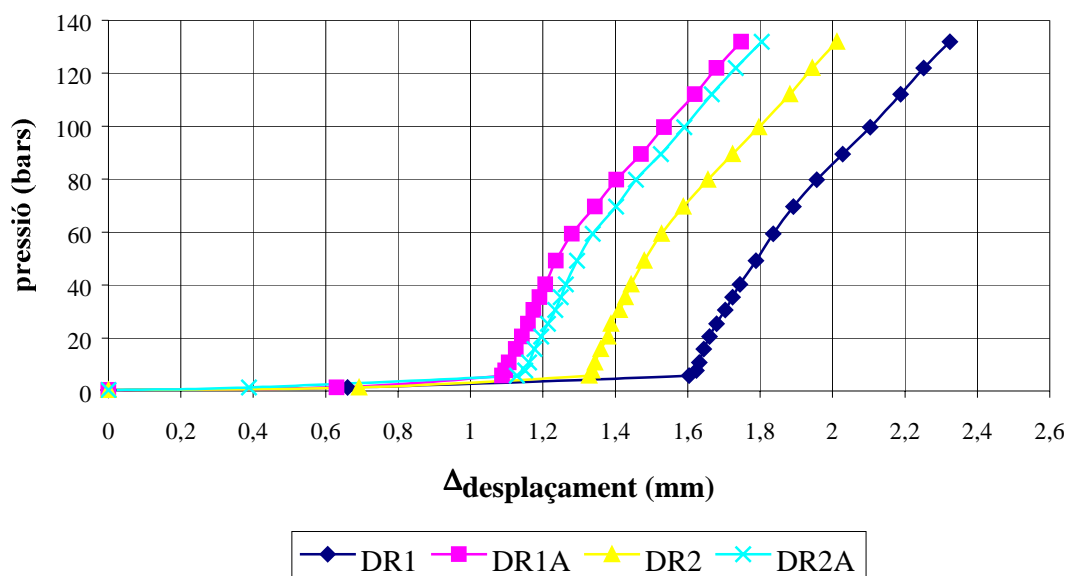


Figura 43 .- Corba de calibració en canonada d'acer.

El factor de correcció per compressibilitat de la membrana s'obté a partir dels pendents de la corba. En el cas del poliuretà s'ha comprovat que presenten dos comportaments diferenciats per dos pendents diferents. En aquest cas, com succeeix en algunes de les membranes de cautxú, s'han d'aplicar dos factors de correcció.

Per a tenir una idea del comportament del poliuretà s'adjunta un gràfica (Figura 44) on apareixen les corbes de control de qualitat que es realitzen al laboratori on s'elaboren.

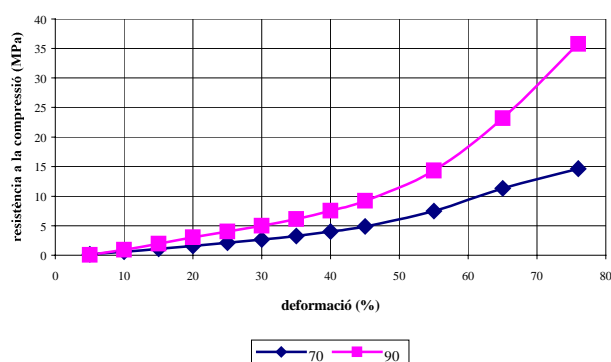


Figura 44 .- Corba de calibració en laboratori.

L'assaig consisteix en col·locar una proveta de poliuretà sota una premsa. S'aplica una velocitat de deformació al pistó de càrrega i es pren el valor de pressió que pateix la proveta amb una cel·la de càrrega. Al mateix temps, es mesura el percentatge de deformació de la proveta.

En aquest exemple apareixen per dureses de poliuretà corresponents a 70 i 90 .

### 7.3 .- Captura de dades

Una de les innovacions més destacades que introdueix aquest equip és la captura de dades digital amb un sistema de tecnologia pròpia, en el desenvolupament del qual s'ha col·laborat activament.

Resulta relativament senzill controlar la fluència quan únicament s'està rebent una dada de desplaçament, però quan són quatre les dades a controlar és inviable. Lo mateix passa a l'hora de prendre la mesura als trenta i als seixanta segons.

El sistema permet emmagatzemar totes les lectures que s'han de prendre al llarg d'un assaig al mateix temps que aquestes s'estan visualitzant tant numèricament com gràficament.

A la vegada s'està intentant automatitzar al màxim l'assaig de manera que en un futur la seva realització sigui lo més senzilla possible.

Aquest estudi només recull la primera fase de desenvolupament, que es presenta a continuació, tot i que a dia d'avui el projecte ja està més avançat.

#### 7.3.1 .- Funcionament de la unitat de control

El primer pas és posar en funcionament tot el sistema elèctric. Cal una font d'energia de 12 volts per a alimentar la unitat de control. En les proves realitzades s'ha utilitzat una bateria estàndard connectada amb un díode a la del mateix vehicle de transport de l'equip, per tal d'anar carregant ambdues alhora i per disposar d'una reserva d'energia en cas de necessitat.



Amb l'ordinador en marxa, com a segon pas, es pot triar si es vol procedir a l'execució d'un assaig (opció "presiòmetro") o bé a la calibració de membranes (opció "funda"). Tractarem aquestes dues opcions per separat tot i que la filosofia és la mateixa.

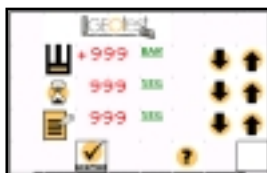
## Metodologia d'assaig



Un cop s'ha triat la opció "OPERA PRD.56", el següent pas és triar la metodologia d'assaig.



Actualment només es disposa de la opció a tensió controlada (stress control). La possibilitat a deformació controlada s'està desenvolupant paral·lelament al sistema de gestió de la bomba. Aquesta permetrà la injecció o extracció d'oli per tal de mantenir el valor de la deformació constant.



L'inici de l'assaig "sensu stricto" és la següent pantalla on es pot triar el valor de pressió del graó de càrrega i l'interval de temps al final del qual es prendrà la mesura. Generalment, i seguint el protocol internacional introduït per Ménard, es prenen mesures als trenta i seixanta segons de cada graó però, si es vol, es poden prendre més dades, per exemple als quinze segons.



Validant aquests paràmetres l'assaig ja es dona per començat i l'ordinador pren els valors que cataloga com a zeros. Aquesta maniobra s'ha de realitzar amb la sonda situada a la cota d'assaig.



Amb la presa de zeros feta, s'efectua el primer graó de càrrega i es procedeix a iniciar el comptador de temps. L'ordinador, de manera automàtica, prendrà lectures als trenta i seixanta segons de cada graó. El comptador de temps es pot aturar en qualsevol moment de l'assaig, ja sigui perquè s'ha produït algun problema, perquè es vol aplicar un altre graó de càrrega, etc.



Si al llarg de l'assaig es vol veure la corba de comportament pressió-desplaçament que està donant el terreny, es pot avançar a la següent pantalla on apareix la corba a l'escala que s'esculli, en funció del moment on es trobi l'assaig.



Quan es decideix aturar l'assaig, cal passar a la següent pantalla i pulsar la opció "final ensayo". L'ordinador gravarà totes les dades numèriques en un disquet.

A l'hora de fer el post-procés de l'assaig, la facilitat de disposar de les dades en format digital, agilita molt més la interpretació dels assaigs.

Les futures innovacions passen per incorporar un mòdem que permeti l'enviament de les dades, per exemple des de l'emplaçament de l'assaig fins a l'oficina, fins a gestionar tota la metodologia de l'assaig en funció del tipus de terreny, des d'argiles toves fins a roca. Segons sigui un material o un altre, l'aplicació de graons de càrrega serà diferent, així com els límits de pressió o de desplaçament recomanables. Si s'ha assolit un d'aquests dos valors massa elevat, límit, el sistema s'aturarà automàticament.

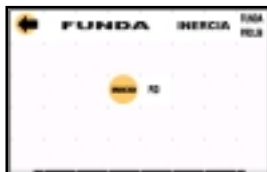
## Metodologia de calibració



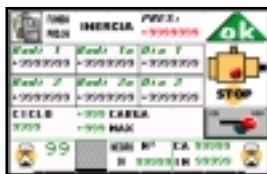
A diferència de la metodologia d'assaig, s'ha de triar la opció "funda".



Es poden donar tant d'alta com de baixa les diferents membranes que es vagin a assajar, i codificar-les, podent conèixer els seus paràmetres elàstics.



Segons el tipus de membrana escollit, l'ordinador ja porta incorporat un protocol de calibració que consta del valor de pressió màxim que es pot assolir, tant en inèrcia a l'aire lliure com en calibració en canonada d'acer, així com el valor de pressió dels graons que s'han d'aplicar. Amb la incorporació de la bomba automàtica, la injecció/extracció de pressió estarà completament controlada i automatitzada, si bé actualment només marca la pauta a seguir. No obstant, si es supera qualsevol valor límit, el sistema s'atura immediatament.



Les lectures en el cas de calibracions només es prenen cada seixanta segons encara que es pot triar una major freqüència de presa de mesures. Les dades queden emmagatzemades en un arxiu a la unitat A de l'ordinador. Al igual que en situació d'assaig, la calibració es pot aturar en qualsevol moment.

## 8 .- REALITZACIÓ D'ASSAIGS

L'assaig pressiomètric, al marge de la realització de la prova tensió/deformació del terreny, precisa d'una sèrie de preparatius que juguen un paper molt important en la obtenció de paràmetres representatius del material. Tractant-se d'una sonda PBP cal tenir especial cura amb la perforació de la cavitat on s'ha de dur a terme l'assaig. La instal·lació de la sonda tindrà un efecte significant sobre la forma de la corba pressiomètrica i en conseqüència sobre els paràmetres que se'n dedueixen.

### 8.1 .- Preparació de l'equip

Abans de realitzar qualsevol prova, cal fer una sèrie de comprovacions que asseguraran la correcta utilització de l'equip.

En primer lloc, cal que l'equip estigui completament saturat per tenir la certesa de que els valors de pressió són correctes. Amb l'equip saturat resulta interessant fer una calibració en canonada d'acer per comprovar que no existeix cap pèrdua al sistema. Paral·lelament es verifica que el sistema elèctric funcioni correctament, és a dir, que les lectures siguin correctes i que l'ordinador guardi les dades a la unitat A.

Si els resultats són positius, l'equip ja està en condicions de realitzar una assaig.

### 8.2 .- Instal·lació

El primer pas en la realització d'assaigs pressiomètrics és l'execució d'un sondeig previ. Al capítol 3 (3.1 .- Pressiòmetres amb perforació prèvia (PBP) s'han presentat els efectes que la instal·lació del pressiòmetre provoca sobre el material que envolta la perforació.

Si bé abans de baixar la sonda a cota és impossible determinar la possible sobreexcavació del sondeig, a mesura que s'està executant la prova es pot detectar aquest efecte i també queda palès en la forma de les corbes d'expansió pressiomètriques.

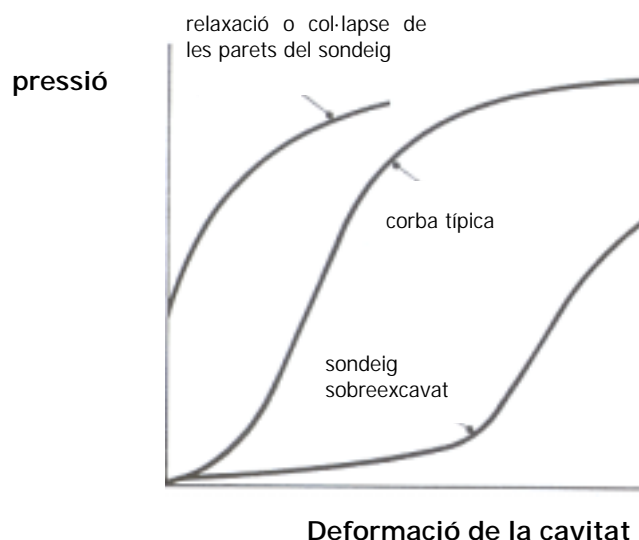


Figura 45.- Diferents formes de corbes pressiomètriques

Un cop fet el sondeig, amb el mateix varillatge de perforació, es situa la sonda a la cota d'assaig. En aquest moment ja s'està en condicions de començar a carregar i prendre mesures.

### 8.3 .- Metodologia d'assaig

Es considera que l'assaig ha començat quan la pressió que s'està aplicant provoca el moviment de la membrana. Si bé existeixen dues metodologies d'assaig (tensió controlada i deformació controlada), aquí només es treballarà segons la metodologia a tensió controlada. Es tracta d'aplicar un graó de pressió, mantenir-lo durant un minut i prendre lectures als trenta i als seixanta segons. El valor d'aquest graó dependrà del moment en que es trobi l'assaig. Així doncs, si tot just es comença l'assaig, els graons seran petits per tal de tenir ben caracteritzat el moment en que entra en contacte la membrana amb el terreny. Quan ja s'ha assolit la fase elàstica del material, els graons poden ser majors, depenent del tipus de terreny. Finalment, quan s'arriba al comportament elastoplàstic els increments sí que solen fer-se majors.

El criteri per aturar l'assaig variarà en funció del tipus de terreny assajat. Si es tracta d'un sòl, l'assaig s'aturarà una mica més enllà de que s'hagi detectat la fluència (a criteri de l'operari), o bé, quan s'hagi assolit el desplaçament màxim del sistema de mesura. Per contra, si es tracta d'una roca, el criteri que governa l'assaig és la pressió perquè segons el tipus de roca és possible no arribar a fluència.



La injecció de pressió s'efectua amb una bomba en superfície o bé nitrogen (Fotografia 15). La bomba pot ser manual (Fotografia 14) o elèctrica, mentre permeti que la realització de graons de descàrrega/recàrrega siguin controlables.

Quan l'assaig es dona per acabat, la descàrrega pot ser ràpida o bé fer-se de manera esglaonada. Per qualsevol dels dos mètodes s'ha de deixar que la sonda es descarregui i recuperi la posició hidrostàtica que li pertoca per la profunditat a la que es troba. D'aquesta manera s'assegura un recuperació sense problemes de la sonda

Fotografia 14.- Bomba manual d'injecció de pressió mitjançant oli.

L'assaig es dona per acabat en el moment que s'ha dut a terme la descàrrega, encara que l'operari no respira tranquil fins que no torna a veure la sonda en superfície.





Fotografia 15 .- Realització d'un assaig utilitzant nitrogen com a sistema de càrrega.

## 9 .- ANÀLISI DE RESULTATS OBTINGUTS

A continuació apareixen un seguit d'assais realitzats en camp per tal de comprovar la fiabilitat de l'aparell. En algun cas s'ha comparat amb resultats obtinguts amb el pressio-dilatòmetre japonès OYO.

Tots els assais s'han realitzat en el context geològic de la plana de l'Empordà, encara que els materials i la seva situació difereixen.

### 9.1 .- ASSAIG 1: Llims sorrencs.

Geogràficament, la prova s'ha realitzat al terme municipal de Vilafant (Girona). Es tracta de graves amb matriu sorrenca a la base, que passen transicionalment a llims sorrencs (Quaternaris). El gruix del paquet de graves varia d'un punt a un altre ja que es tracta d'un dipòsit d'origen fluvial corresponent a un ambient torrencial de tipus anostomosat.

A la cota d'assaig, 2 metres, el material aparegut són llims sorrencs.

En primer lloc es presenta la corba d'expansió bruta.

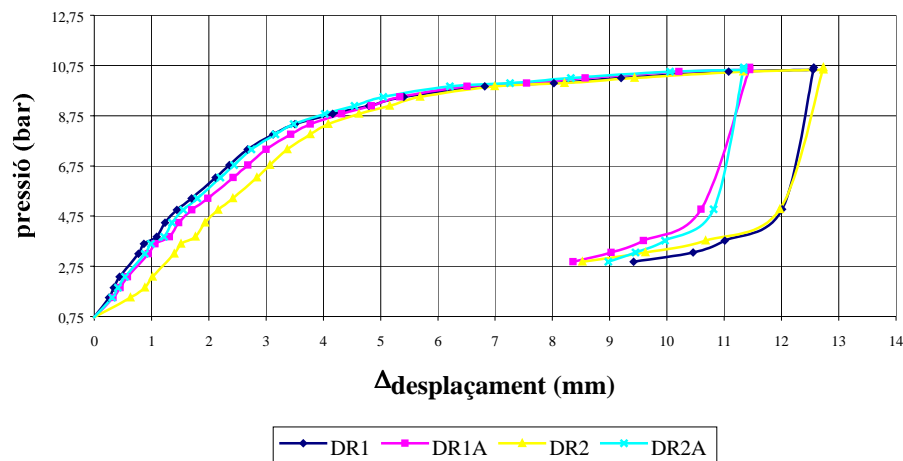


Figura 46.- Corba pressiomètrica bruta.

Per tal tenir una idea més clara de l'expansió de la cavitat s'han sumat els radis oposats, obtenint dos diàmetres.

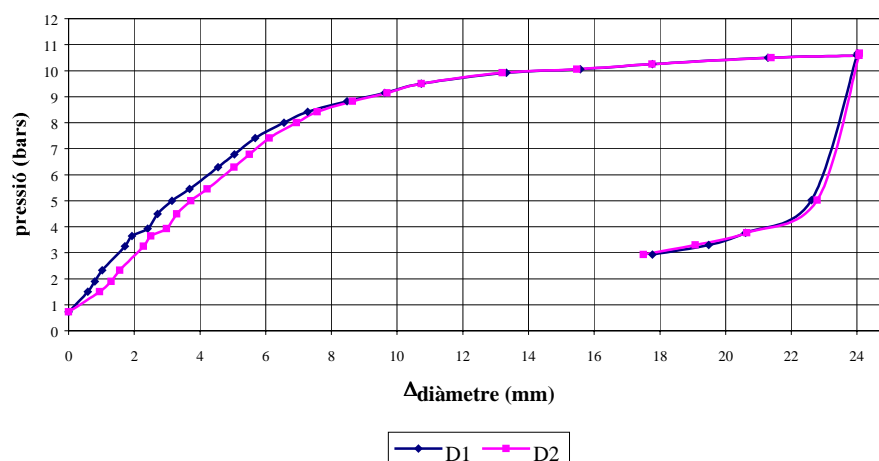


Figura 47.- Corba pressiomètrica bruta expressada en increments de diàmetre.

El criteri que s'acostuma a seguir per aturar l'assaig és el control de la fluència. La fluència es pot definir com la resta entre el desplaçament als 60 i als 30 segons per a un mateix graó. Per fer aquest factor més evident s'han representat en una gràfica.

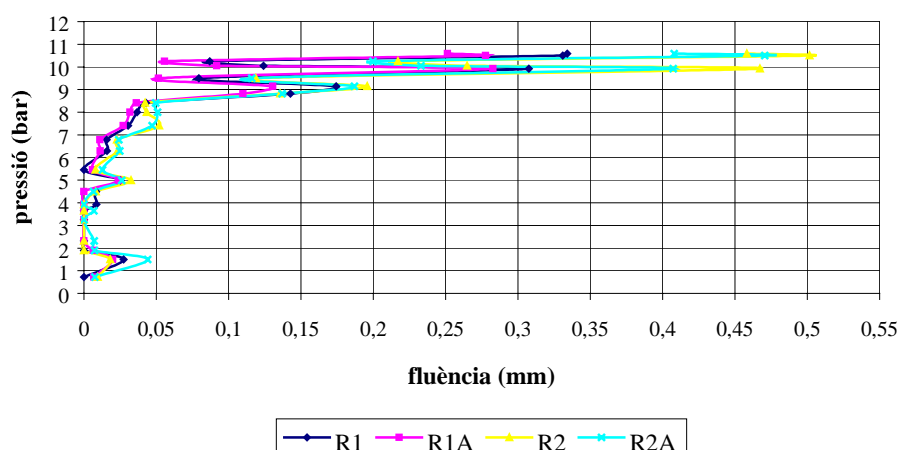


Figura 48.- Gràfica de la fluència del terreny.

Veient aquesta gràfica es podria determinar que el terreny entra en fase elastoplàstica cap als 8,5 bars. La fluència es fa molt més gran i per a increments petits de pressió, l'increment de desplaçament és major. No obstant cal aplicar les respectives correccions de la membrana i treballar sobre valors corregits per determinar els paràmetres pertinents.

S'ha realitzat una assaig en el mateix terreny amb la sonda pressiomètrica OYO per tal de comparar els resultats. L'OYO dona mesura incremental de diàmetre i és per aquesta raó que es comparen els resultats amb els diàmetres del PRD.

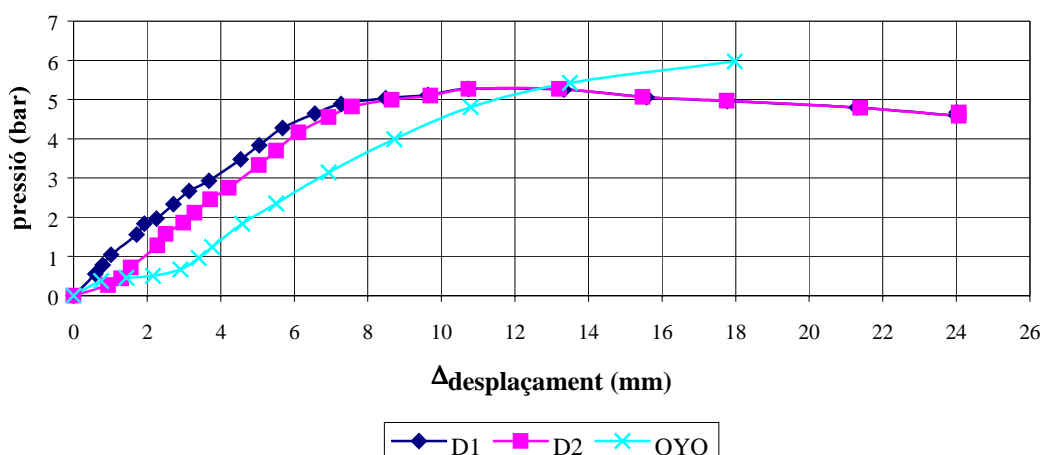


Figura 49.- Corbes d'expansió corregides obtingudes amb la sonda OYO i amb la sonda PRD

Aquestes corbes donen molt de sí i potser la millor manera de començar és descrivint diferents aspectes de les mateixes.

Es pot determinar un valor d'inici de la fase elàstoplastica similar en ambdós casos. A grans trets, a partir de 300 KPa (3 bar) la fluència augmenta considerablement. Així doncs, podem situar l'inici de la fase elàstoplastica cap als esmentats 300 KPa.

A la vista de la Figura 49 es pot concloure:

- Les dues sondes donen un comportament elàstic similar, amb la salvetat de la qualitat de la perforació. Aquest fet era d'esperar perquè s'està assajant el mateix tipus de terreny, però corrobora la fiabilitat de la sonda PRD en aquest tram elàstic.
- Si bé l'inici de la fase elàstoplastica es pot situar cap als 300 KPa en ambdós casos, el comportament al llarg d'aquesta fase és prou diferent com per comentar alguns detalls.

En primer lloc cal recordar que la membrana d'OYO té el doble de gruix que la del PRD. En segon lloc, el comportament de la membrana de poliuretà és molt més elàstic que la de cautxú, malgrat ambdues membranes posseeixin la mateixa rigidesa, 80 concretament. Amb aquests dos factors i amb l'experiència d'haver realitzat l'assaig, es pot justificar aquest efecte amb dues raons.

Per començar, la membrana de poliuretà posseeix una capacitat d'expansió elàstica major que el cautxú. D'aquesta manera, tot i haver aplicat la correcció pertinent, quan el terreny ja no oposa la resistència inicial, ha arribat a fluència, li resulta més fàcil expandir-se. Aquest fet es transforma, en lo respectiu a la realització de l'assaig, en una demanda d'injecció de pressió per tal de mantenir el valor de pressió del graó constant. Les membranes de cautxú, dins el rang de treball, no tenen aquest comportament tant marcadament elàstic i l'expansió és molt més controlada.

Degut a que encara no es disposa del sistema d'injecció automàtic, i per tant la injecció de pressió és manual (Fotografia 14), el control del graó de pressió és més complicat.

Això ens porta cap a la segona raó. L'ordinador capta el valor de pressió als trenta segons, quan pren la primera lectura de desplaçament del graó. Això és així perquè es suposa que la pressió roman constant al llarg del graó. Per aquest motiu si, per exemple, es vol aplicar un increment de pressió d'un bar (100 KPa) en la fase elastoplàstica, fent la injecció a l'inici del graó és possible que el valor de pressió capturat pel sistema de mesura sigui inferior al valor de pressió aplicat realment, degut a la ràpida expansió de la membrana i la dificultat que representa mantenir manualment un flux de fluid constant. Això explicaria perquè els graons finals de l'assaig són tant petits.

El que resulta evident és que el desplaçament creix considerablement amb petits increments de pressió.

- Cal remarcar el descens de pressió al tram elastoplàstic de la corba corregida. Aquest efecte es deu a la velocitat d'expansió de la membrana i a la dificultat que això comporta a l'hora de mantenir el valor de pressió constant. Aquests valors de pressió són, amb total seguretat, majors que els capturats pel registrador de paràmetres. Aquest efecte quedaria solucionat amb una operativa d'assaig a deformació controlada que en lloc de fixar un valor de pressió constant al llarg del graó, determinés una deformació constant al llarg del mateix, prenent mesures de pressió cada 15 segons.
- Els paràmetres més característics que es poden deduir es presenten a continuació.

Per donar un exemple dels paràmetres que es poden obtenir, a continuació s'ha calculat el mòdul de tall  $G$  a partir de les corbes del PRD i de la corba de l'OYO. Donat que no s'ha realitzat cap cicle de descàrrega i recàrrega s'està parlant del mòdul inicial  $G_i$ .

La fórmula que s'ha utilitzat és:

$$G = \frac{(P_2 - P_1)}{\left[ \left( \frac{r_2 - r_0}{r_0} \right) - \left( \frac{r_1 - r_0}{r_0} \right) \right]}$$

on  $r_0$  és el radi de la cavitat inicial;  $r_1$  i  $P_1$  són els valors de radi i pressió a l'inici de la fase elàstica i  $r_2$  i  $P_2$  els valors de radi i pressió al final de la fase elàstica. Pel que fa a la sonda PRD s'ha treballat amb diàmetres, suma dels radis oposats, per tal de simular la mateixa situació que l'OYO. Amb tot això, els resultats obtinguts són:

	PRD/D1	PRD/D2	OYO
$G_i$	2200 KPa	2100 KPa	1600 KPa

Aquests resultats posen de manifest el bon comportament i fiabilitat de la sonda PRD en l'anàlisi de la fase elàstica.

Per tal de calcular la pressió límit de manera gràfica és interessant tenir un mínim de tres punts en la fase elastoplàstica.

S'han eliminat els valors dubtosos de les corbes netes del PRD i els resultats han sigut del tot satisfactoris.

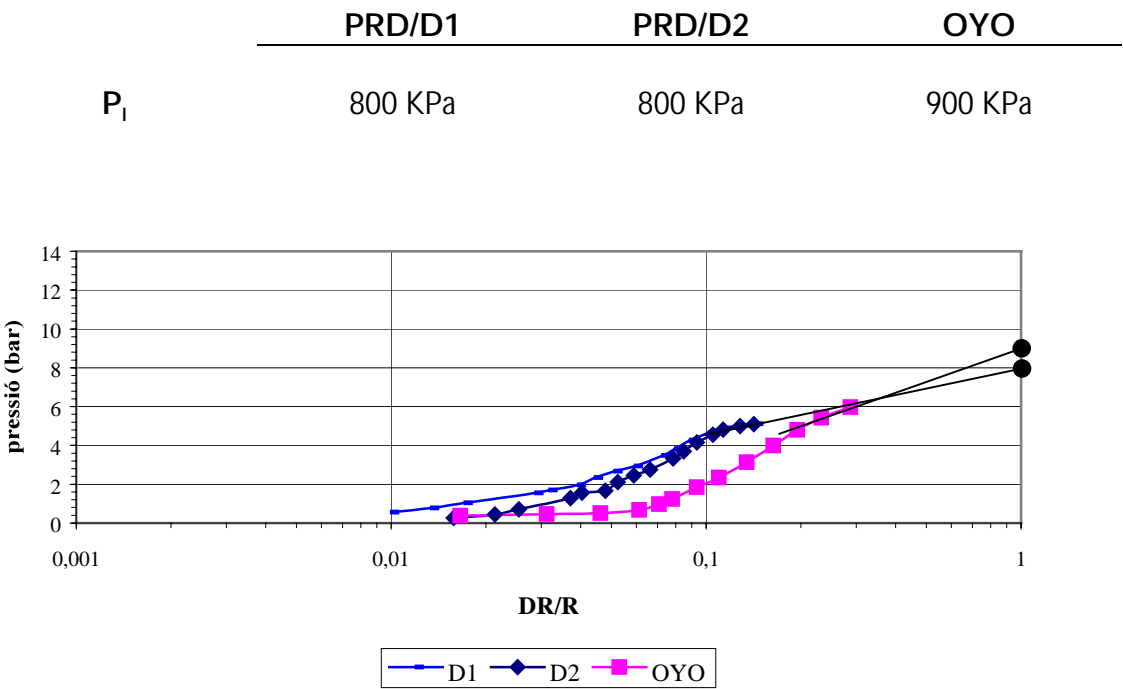


Figura 50.- Determinació gràfica de la pressió límit.

## 9.2 .- ASSAIG 2: Reblert argilós.

En aquest cas la població d'assaig és Pontós (Girona). Si bé el dipòsit original constava d'argiles i llims amb un percentatge baix de sorra de mida de gra fi, l'activitat extractiva duta a terme a la zona ha condicionat la nova constitució dels dipòsits actuals. A la cota d'assaig (2 metres) es troba material remogut de la mateixa explotació d'argiles, concretament reblerts sorrencs amb una matriu argilosa.

La corba d'expansió bruta té el següent aspecte:

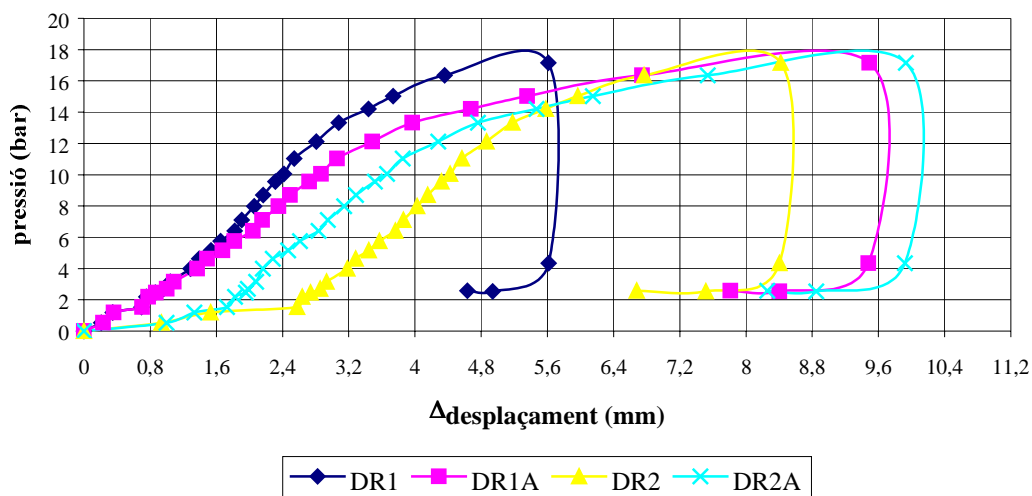


Figura 51.- Corba pressiomètrica bruta.

Com s'ha introduït en l'exemple anterior, la gràfica de fluència ajudarà a decidir el final de l'assaig.

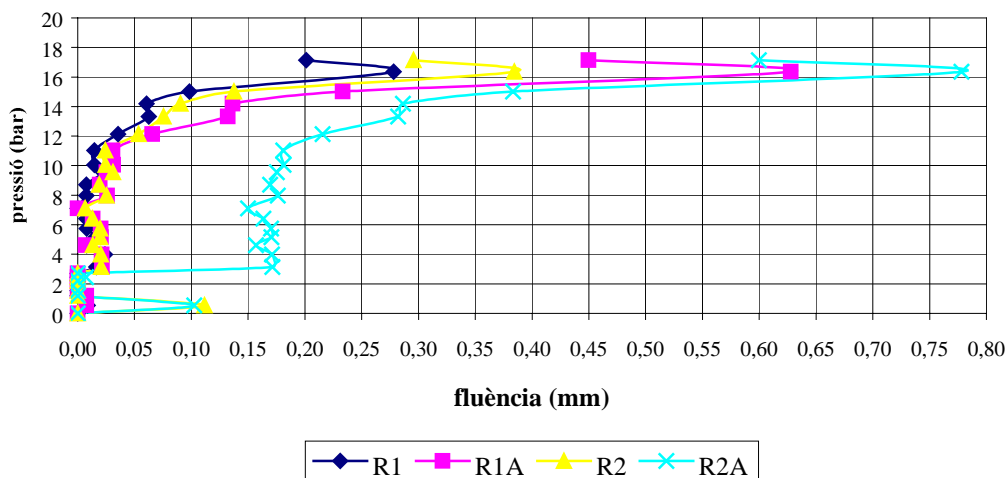


Figura 52.- Gràfica de la fluència del terreny.

En aquest cas el comportament resulta ser molt més caòtic. Els dipòsits de reblerts acostumen a ser bastant heterogenis raó per la qual els desplaçaments són tant diferents. Aplicant la correcció de la membrana (Figura 53) la pressió de fluència es pot estimar de l'ordre dels 900 KPa (9 bar) a 1000 KPa (10 bar) per a tots els radis.

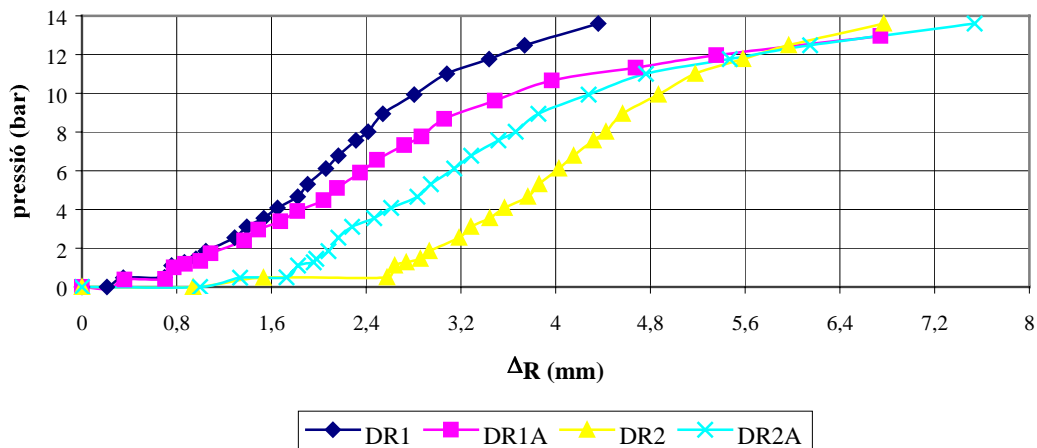


Figura 53.- Corba pressiomètrica corregida.

A partir d'aquí i aplicant la fórmula presentada en l'apartat anterior, els mòduls de tall calculats són:

	R1	R1A	R2	R2A
$G_i$	9700 KPa	8600 KPa	9800 KPa	7800 KPa

Per a determinar la pressió límit gràficament es representa la corba pressió – DR/R en escala logarítmica. En aquest cas no s'ha eliminat cap punt perquè l'assaig s'ha aturat en valors d'expansió menors, **on encara no apareix la problemàtica del manteniment de la pressió constant al graó.**

Afegint rectes de tendència que segueixin els últims quatre punts de la fase elastoplàstica s'obté, al punt de tall amb  $DR/R = 1$ , la pressió límit de manera gràfica.

	R1	R1A	R2	R2A
$P_i$	2900 KPa	2400 KPa	2900 KPa	2500 KPa



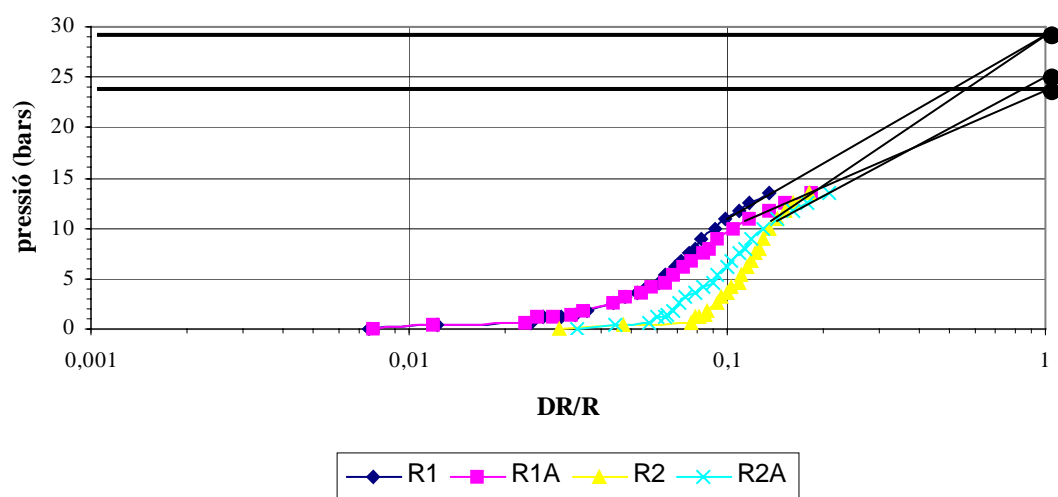


Figura 54.- Determinació gràfica de la pressió límit.

### 9.3 .- ASSAIG 3: Argila.

L'assaig s'ha dut a terme a El Pont del Príncep, pertanyent al terme municipal de Vilamallà (Girona). Es tracta d'argiles de colors vermellorsos, ocasionalment llimoses i força plàstiques. A la part superior solen mostrar concrecions de carbonat nodulars i tubulars. Genèticament corresponen a l'erosió dels relleus terciaris adjacents i la seva posterior acumulació.

En aquesta prova s'ha utilitzat un sistema de càrrega diferent al dels exemples anteriors, nitrogen sec. Amb aquest s'assegura la càrrega constant a cada graó, de manera que si la pressió disminueix dins la sonda és a causa únicament de l'expansió de la membrana. La cota d'assaig és de 5 metres.

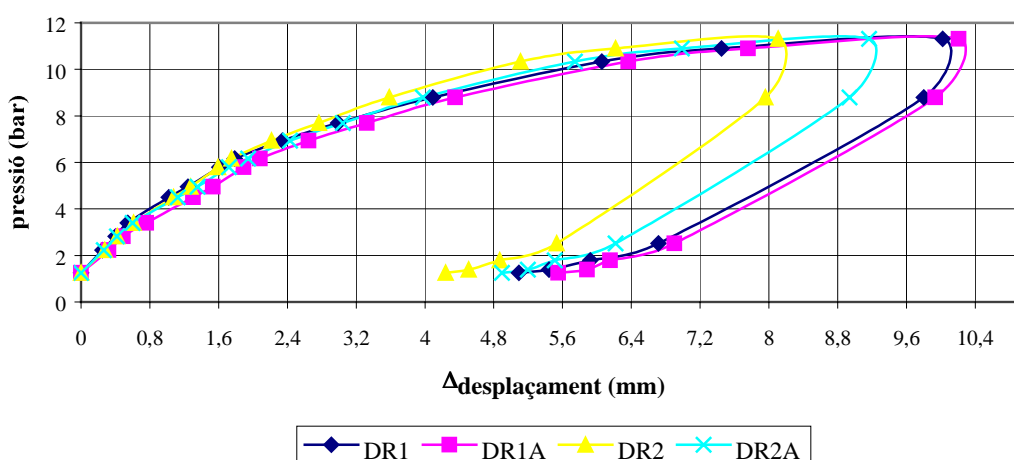


Figura 55.- Corba pressiomètrica bruta.

Es tracta d'unes argiles toves amb un percentatge de llim bastant reduït. Es pot veure com entre els 4 i els 6 bar el terreny comença a moure's i és a prop dels 7 bar quan realment es percep la fluència del terreny (Figura 56).

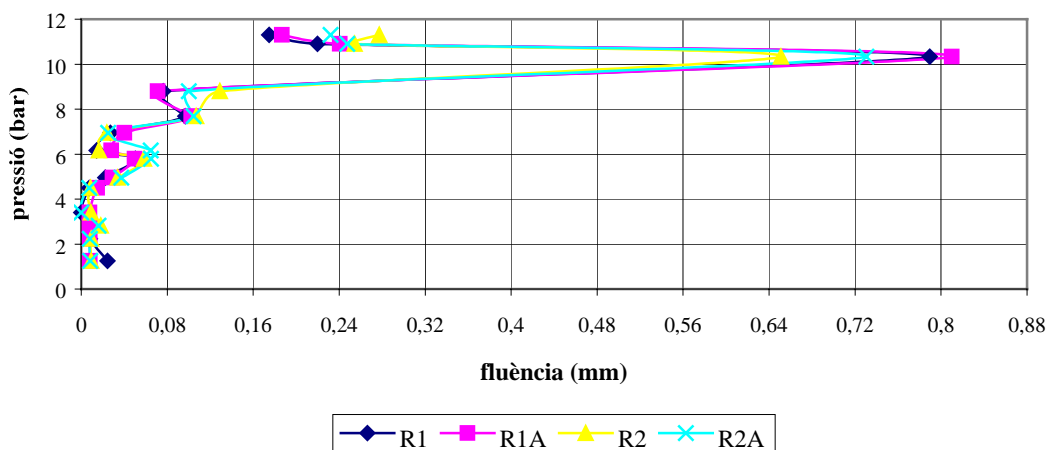


Figura 56.- Gràfica de la fluència del terreny.

Aplicant la correcció de la membrana:

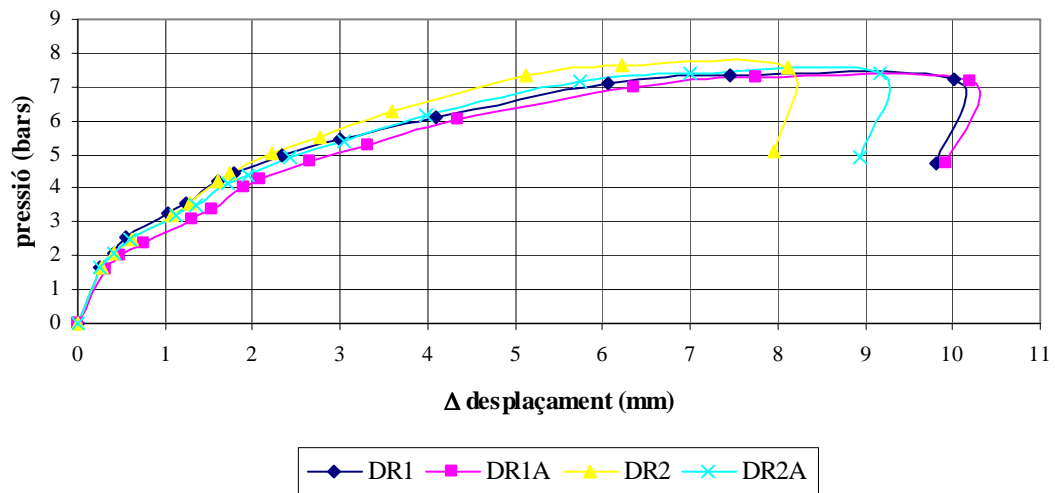


Figura 57.- Corba pressiomètrica corregida.

Essent els mòduls calculats:

	R1	R1A	R2	R2A
$G_i$	2600 KPa	2200 KPa	2800 KPa	2100 KPa

La pressió límit determina de manera gràfica es mostra a la Figura 58.

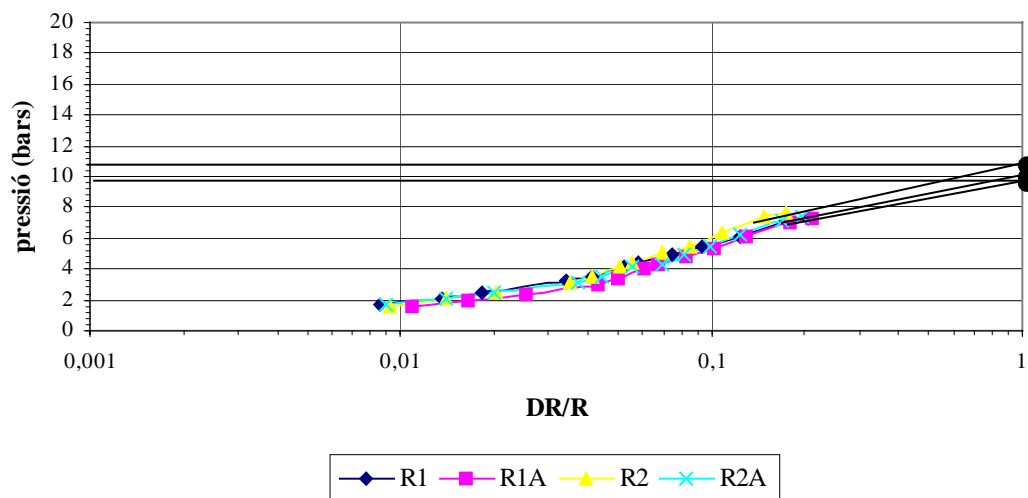


Figura 58.- Càlcul gràfic de la pressió límit.

El valors obtinguts són:

	<b>R1</b>	<b>R1A</b>	<b>R2</b>	<b>R2A</b>
<b>P<sub>i</sub></b>	1050 KPa	1000 KPa	1100 KPa	1050 KPa

## 10 .- CONCLUSIONS

---

- La incorporació de transductors de desplaçament, com són els LVDT, significa l'obtenció d'una major precisió del sistema de mesura del desplaçament de les parets de la cavitat. Ara bé, per aprofitar les millores que brinden aquests transductors, cal disposar d'un sistema mecànic adient per no alterar aquest avantatge. Aquest fet és el que provoca que en l'actual versió del PRD es disposi d'una precisió de 0,01 mm quan en realitat el conjunt LVDT/braç captor disposa d'una precisió 0,003 mm → es pot millorar.
- Disposar de quatre radis de lectura del desplaçament a 90 graus permet detectar la presència d'heterogeneïtats al terreny. És per aquesta raó que resulta especialment pràctic en roques que presentin discontinuïtats. D'altra banda, la capacitat d'obertura dels braços permet obtenir més dades en la fase elàstic del material i per tant una millor caracterització de terrenys tous.
- La introducció d'un nou material per a la fabricació de les membranes introdueix una altra component de dificultat en el desenvolupament perquè, a més a més del desenvolupament de la sonda en sí, cal caracteritzar el comportament de les mateixes.
- Les membranes de poliuretà disposen de la meitat de gruix que les de cautxú utilitzades per la sonda OYO i d'un comportament molt més elàstic que permet l'assoliment de desplaçaments majors. Per contra, aquest comportament tant elàstic és el causant de que les corbes de calibració presentin aquesta forma tant característica, amb un pendent final més lax que l'inicial
- El nou registrador de paràmetres digital facilita la realització dels assaigs, gràcies a la captura de dades automàtica i al ventall de possibilitats que proporciona. La opció futura de triar tipus d'assaig va íntimament lligada al desenvolupament d'una bomba elèctrica i a la vegada automàtica, gestionada pel mateix programa informàtic que controla l'assaig. Els paràmetres de seguretat donen més facilitat a l'operari per controlar tot el procés de la prova pressiomètrica.
- De cara a determinar tendències i comportaments de la sonda caldria realitzar un major nombre de proves a camp. La realització d'aquestes proves condicionarà les futures millores a aplicar al conjunt.
- Per tal d'evitar els problemes a la fase elàstic caldria disposar d'un sistema d'injecció de pressió (en procés de desenvolupament) capaç d'injectar una certa quantitat de fluid coneguda i anotar el valor de pressió cada 15 segons. Això es tradueix en una metodologia d'assaig a deformació controlada que injecta fluid en cas de demanda i el succona en cas d'excés. Aquest fet reforça la hipòtesi d'utilitzar una metodologia a tensió controlada en la fase elàstica del material i una metodologia a deformació controlada en la fase elàstic presentada en aquest treball.

## 11 .- REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

---

- [1] Ménard, L., *An apparatus for measuring the strength of soils in place*, Tesis, University of Illinois, 1957
- [2] Jézéquel, J.F., Lemasson, H. and Touzé, J., *Le pressiomètre Louis Ménard quelques problèmes de mise en oeuvre et leur influence sur les valeurs pressiométriques*, Bull. De Liaison du LCPC, No. 32, 97-120, 1968.
- [3] Baguelin, F., Jézéquel, J.F. i Shields, D.H., *The Pressuremeter and Foundation Engineering*, Trans. Tech. Publication, 1978.
- [4] Mair, R.J. and Wood, D.M., *Pressuremeter Testing –Methods and interpretation*, Butterworth, 1987.
- [5] Briaud, J.L., *The Pressuremeter*, Balkeema, Rotterdam, 1992.
- [6] Clarke, B.G., *Pressuremeter in geotechnical design*, Blackie Academic& Profesional, 1995.
- [7] Devincenzi, M; Frank, N., *Ensayos geotécnicos in situ – Ensayo presiométrico Ménard*, Monografias IGEOEST, 2001.
- [8] Wroth, C.P. i Hughes, J.M.O., *An instrument for the in-situ measurement of the properties of soft clays*, Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. SMFE, Moscow, Vol. 1.2, pp.487-494, 1973.
- [9] Clarke, B.G. i Allan, P.G., *Self-boring pressuremeter for testing weak rock*, Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. SMFE, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 1, pp. 211-213, 1989.
- [10] Page of Cambridge in situ, [www.Cambridge-insitu.com](http://www.Cambridge-insitu.com), 2000.
- [11] Celada, B. i Galera, J.M., *The pressuremeter and its new avenues*, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, pp. 265-272, 1995.
- [12] Clarke, B.G. i Smith, A., *A model specification for radial displacement measuring pressuremeters*, Ground Engng, 25(2), 28-38, 1992.
- [13] Briaud, J.L., *Pressuremeter and deep foundation design*, Proc. 2<sup>nd</sup> Int Symp. Pressuremeter Marine Appl., Texam, USA, ASTM STP 950, pp. 376-405, 1986.
- [14] Yu, H.S., *Cavity expansion methods in geomechanics*, Kluwer academic publishers, 2000.
- [15] Rowe, P.W., *The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact*, Proc. Royal Soc., 269 (Series A), 500-527, 1962.
- [16] Hugues, J.M.O., Wroth, C.P. i Windle, D., *Pressuremeters tests in sands*, Geotechnique, 27 (4), 455-477, 1977.
- [17] Manassero, M., *Stress-strain relationships from drained self-boring pressuremeter tests in sands*, Geotechnique, 39 (2), 293-307, 1989.
- [18] Marsland, A i Randolph, M.F., *Comparisons on the results from pressuremeter tests and large in-situ plate tests in London clay*, Geotechnique, 27 (2), 217-243, 1977.
- [19] Hawkins, P.G., Mair, R.J., Mathieson, W.G. i Muir Wood, D., *Pressuremeter measurement of total horizontal stress in stiff clay*, Proc. 3<sup>rd</sup> In, Symp. Pressuremeters, Oxford, pp. 321-330, 1990.
- [20] Arnold, M., *Empirical evaluation of pressuremeter test data*, Can. Geotech. J., 18 (3), 455-459, 1981
- [21] Jefferies, M.G., *Determination of horizontal geostatic stress in clay with self-bored pressuremeter*, Can. Geotech. J., 25 (3), 559-573, 1988.
- [22] Wroth, C.P., *British experience with the self-boring pressuremeter*, Proc. Int. Symp. Pressuremeter and its Marine Appl., Paris, pp. 143-164.
- [23] Fahey, M. i Jewell, R.J., *Effect of pressuremeter compliance on measurement of shear modulus*, Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Symp. Pressuremete, Oxford, 115-124, 1990.
- [24] Gibson, R.E., i Anderson, W.F., *In situ measurements of soil properties with the pressuremeter*, Civ. Engng Public Wks, Rev., 56, 615-618, 1961.
- [25] Yu, H.S. i Collins I.F., *Analysis of self-boring pressuremeter test in overconsolidated clays*, Geotechnique, 48 (5), 689-693, 1998.
- [26] Palmer, A.C., *Undrained plane-strain expansion of a cylindrical cavity in clay: a simple interpretation of the pressuremeter test*, Geotechnique, 22 (3), 451-457, 1972.
- [27] Baguelin, F., Jézéquel, J.F., Le Mée, E. i Le Méhauté, A., *Expansion of cylindrical probes in cohesive soils*, J. SMF Div., ASCE, 98 (SM11), 129-142, 1972.
- [28] Ladanyi, B., *In-situ determination of undrained stress-strain behaviour of sensitive clays with the pressuremeter*, Can. Geotech. J., 9(3), 313-319, 1972.
- [29] Houlby, G.T. i Withers, N.J., *Analysis of the cone pressuremeter test in clay*, Geotechnique, 38 (4), 575-587, 1988.

[30] Robertson, P.K., i Hughes, J.M.O., *Determination of properties of sand from self-boring pressuremeter test*, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. Pressuremeter Marine Appl., Texam, USA, ASTM STP 950, pp. 283-302, 1986.  
Schnaid, F., *Pressuremeter Testing: Short course. International Conference on In situmeasurement of soil properties and case histories*, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil, 2001.

---

## **A.1 .- ANNEX DE CALIBRACIONES**

---



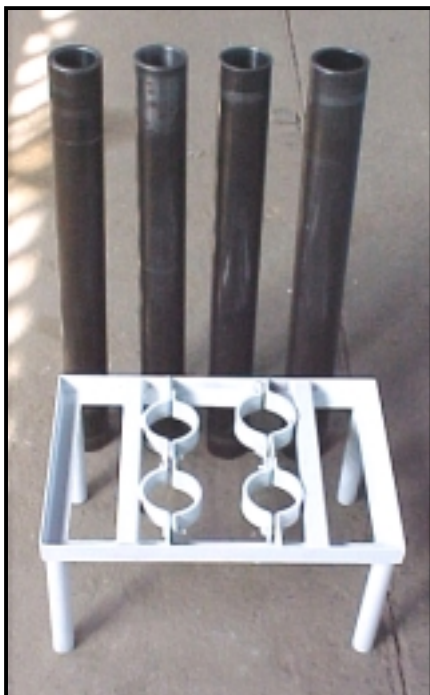
### A.1.1 .- Calibracions de les membranes

Com ja s'ha introduït prèviament, les calibracions que es realitzen a les membranes es poden englobar en inèrcies a l'aire lliure i en assaig de compressibilitat en canonada d'acer. A continuació apareixen les calibracions de les diferents membranes de les que es disposa. S'ha fet servir una nomenclatura diferent per a cada una de les membranes en funció de la seva rigidesa. Tot i que el seu color ja les classifica per dureses, s'han de numerar les membranes de les mateixes característiques.



Figura A.1 .- Fotografia de les diferents membranes utilitzades.

D'aquesta manera, les membranes de color blau, corresponents a una duresa de 70, reben el nom de B i el respectiu numero de classificació ( B1, B2,...). Les membranes de color vermell, corresponents a una duresa de 80, reben el nom de F i el respectiu numero de classificació ( F1, F2,...) i finalment, les membranes grogues, corresponents a una duresa de 90, reben el nom de M i el respectiu numero de classificació (M1,M2...).

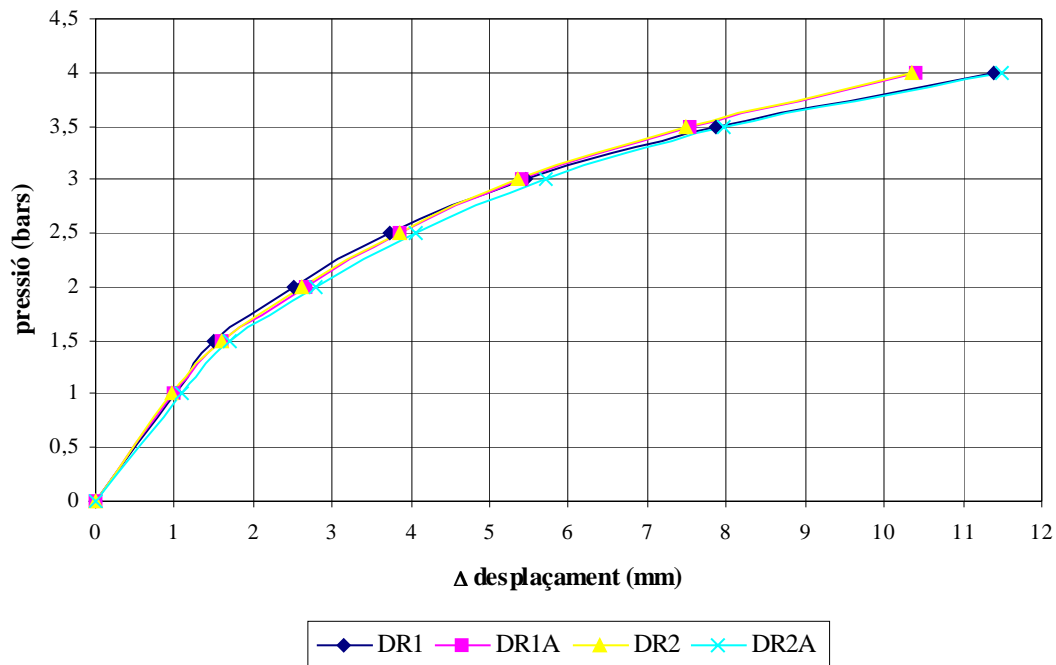


Els diàmetres de les canonades de calibració són de 75, 80, 85 i 90 mm, si bé en aquest treball només es presenten les realitzades amb una canonada de 75 mm .

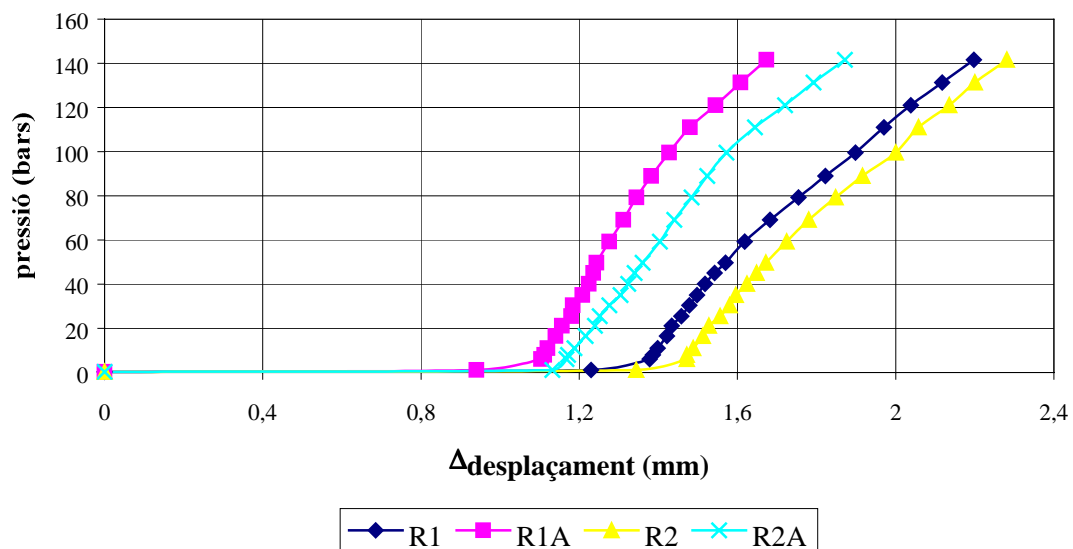
Figura A.2 .- Canonades de calibració.

## CALIBRACIÓ MEMBRANA F1

- Inèrcia a l'aire lliure

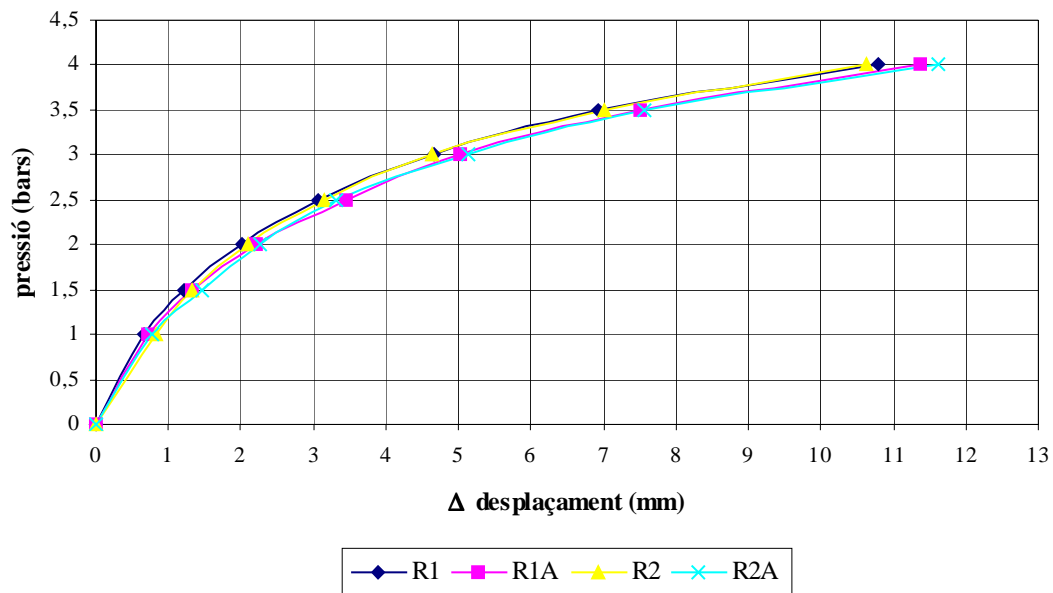


- Compressibilitat de la membrana

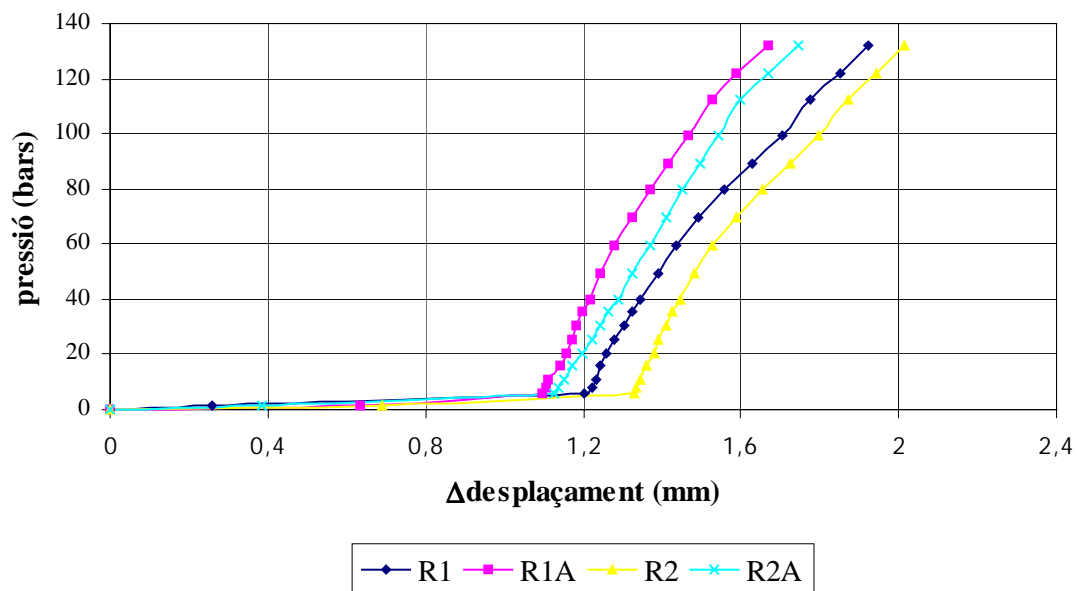


## CALIBRACIÓ MEMBRANA F2

- Inèrcia a l'aire lliure

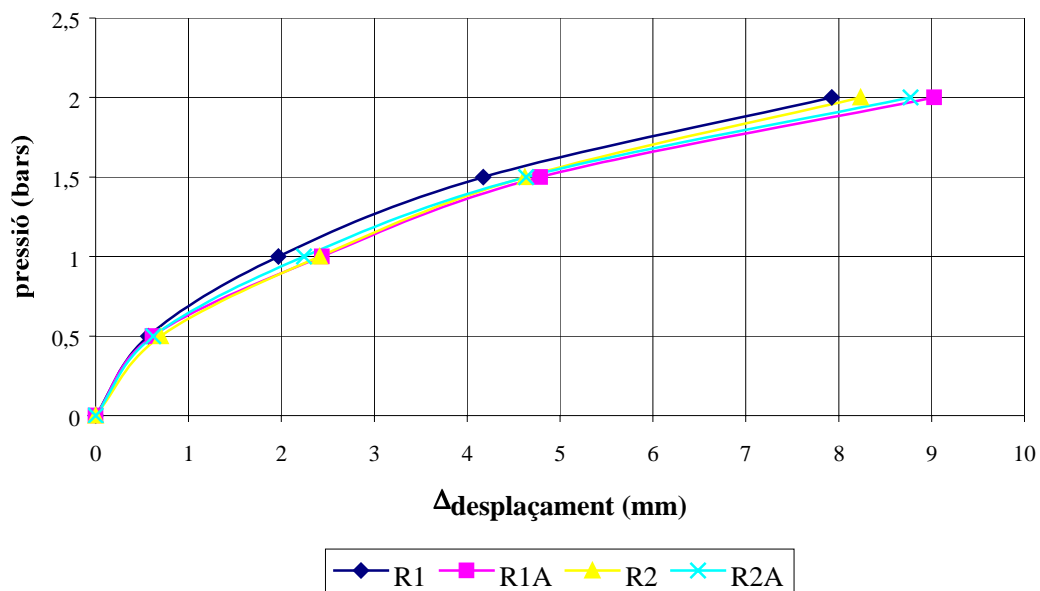


- Compressibilitat de la membrana

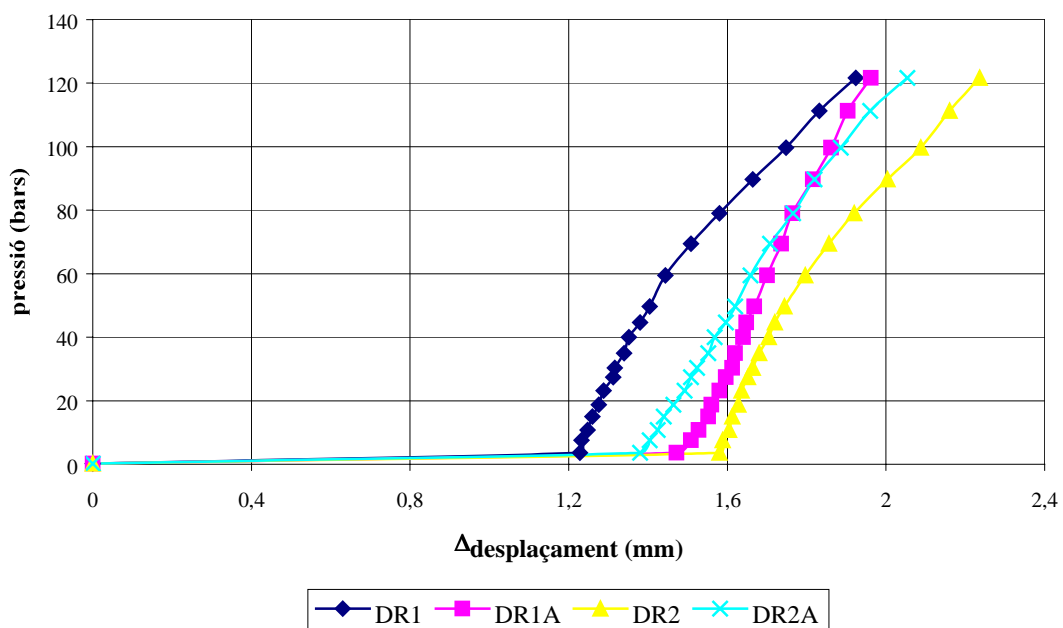


## CALIBRACIÓ MEMBRANA B3

- Inèrcia a l'aire lliure

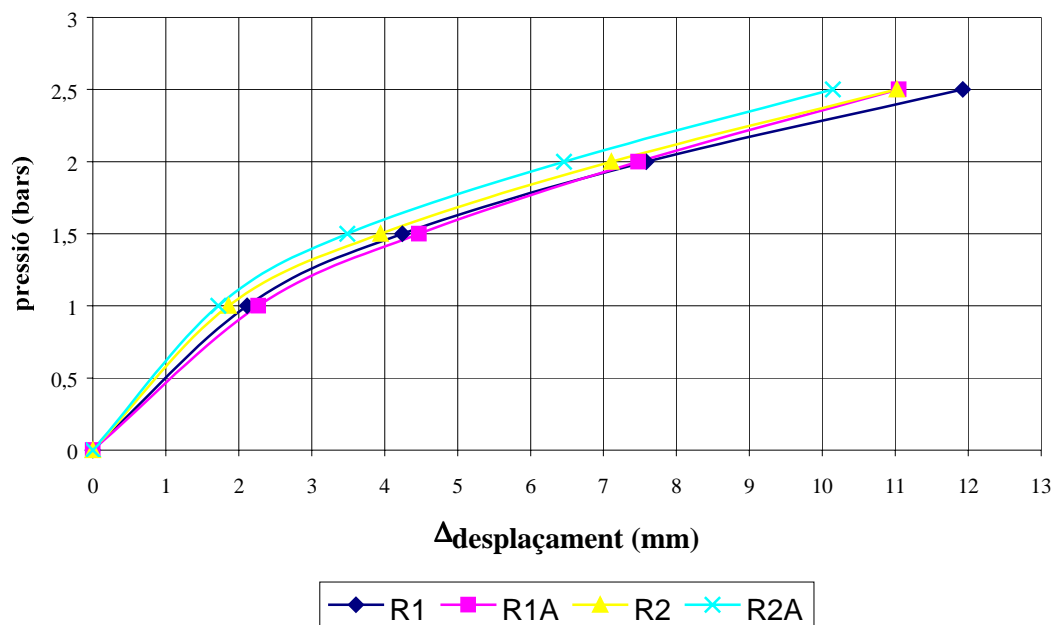


- Compressibilitat de la membrana

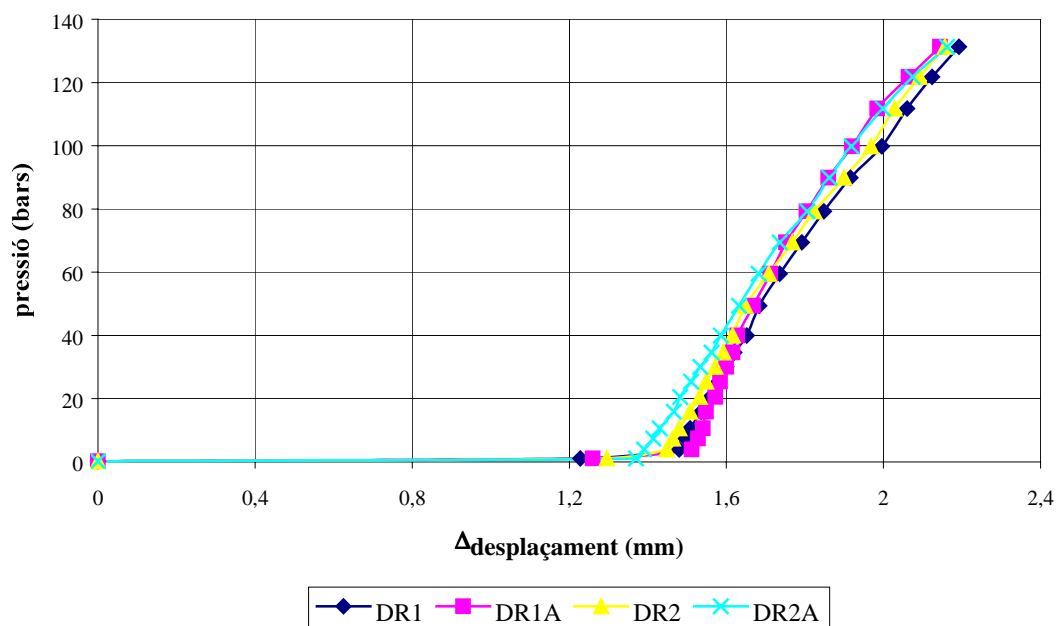


## CALIBRACIÓ MEMBRANA B4

- Inèrcia a l'aire lliure

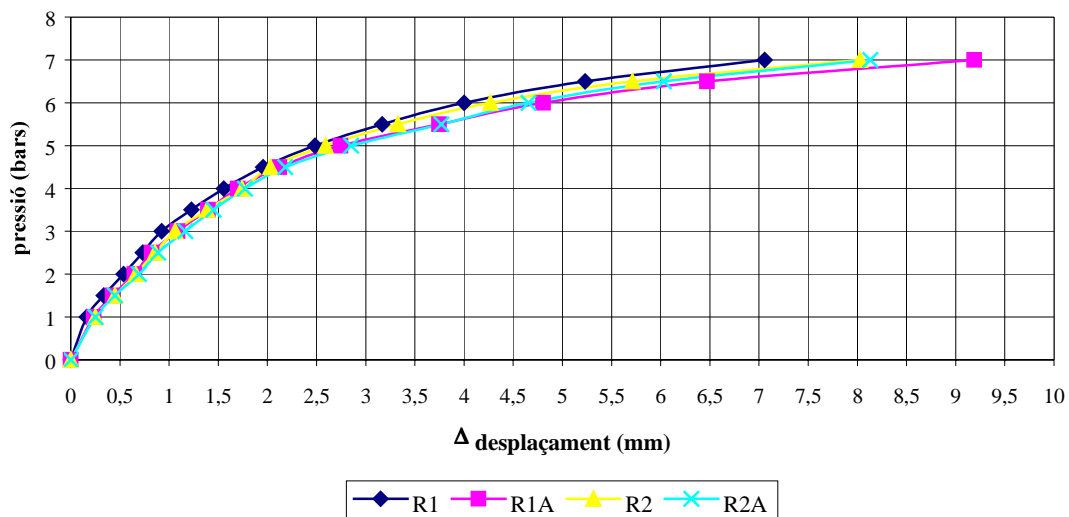


- Compressibilitat de la membrana



## CALIBRACIÓ MEMBRANA M1

- Inèrcia a l'aire lliure



- Compressibilitat de la membrana

